



**Hugo Simões
Ferreira**

**Veículo Autónomo Aquático de Pequenas Dimensões
para Monitorização Ambiental**



**Hugo Simões
Ferreira**

Veículo Autónomo Aquático de Pequenas Dimensões para Monitorização Ambiental

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Doutor Miguel Augusto Mendes Oliveira e Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Doutor Paulo Bacelar Reis Pedreiras

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Prof. Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Daniel Filipe Albuquerque

Professor adjunto do Instituto Politécnico de Viseu – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

agradecimentos /

acknowledgements

À minha família, principalmente aos meus pais e irmão, por todo apoio, dedicação e preocupação demonstrada ao longo de todo o percurso académico. Especial agradecimento ao meu bisavô por todos os ensinamentos e por sempre me ter incentivado a traçar este percurso.

À minha namorada, Juliana Figueiredo, por toda a dedicação, motivação, esforço, apoio e compreensão, sendo um pilar essencial ao longo do meu percurso académico.

Aos meus amigos Henrique, Rui, Pedro, Vilas e João que estiveram sempre presentes com enorme espírito de camaradagem, disponibilidade e amizade, tornando este percurso mais enriquecedor e fácil de superar.

Aos meus orientadores, Professor Rui Manuel Escadas Martins e Professor Miguel Oliveira e Silva, pela ajuda na concretização desta dissertação e ajuda a superar as dificuldades que foram surgindo.

À Universidade de Aveiro e em especial ao Departamento de Eletrónica e Telecomunicações pelas condições e recursos disponibilizados ao longo de todo o percurso académico.

palavras-chave

água, análise, amostra, barco, corpo de água, laboratório, radiofrequência, geolocalização.

resumo

A água doce é um recurso essencial à sobrevivência humana, necessitando o Homem desta para atividades pecuárias, agrícolas, lúdicas e principalmente para consumo, sendo, portanto, imprescindível monitorizar a qualidade da água de corpos de água doce de forma a sinalizar aqueles que se encontram em condições apropriadas de uso e identificar focos de poluição.

Tipicamente o processo de monitorização envolve a recolha, conservação, transporte e análise em laboratório, sendo um processo demorado e delicado dada a facilidade de degradação da amostra e a distância a que muitos dos corpos de água a analisar se encontram dos laboratórios.

Nesta dissertação desenvolveu-se um protótipo de um veículo não tripulável – barco – com locomoção própria em ambiente aquático, capaz de transportar um equipamento laboratorial de recolha e análise de água, em barragens, lagos e rios com fracas correntes. O protótipo é controlado remotamente por um operador, tem capacidade para comunicar dados por radiofrequência (RF), sistema de geolocalização e é autónomo energeticamente.

Os resultados obtidos demonstram que os sistemas de locomoção, comunicação, geolocalização e autonomia energética foram desenvolvidos e implementados com sucesso.

keywords

water, analysis, sample, boat, body of freshwater, laboratory, radio frequency, geolocation.

abstract

Freshwater is an essential resource for human survival. Man requires this to do activities such as livestock, agricultural, entertainment and mostly for consumption, and it is therefore essential to monitor the quality of the water of freshwater bodies in order to signal those that are in conditions of consumption and identify pollution sources.

Typically, the verification process involves the collection, storage, transport and analysis in the laboratory. This is a prolonged and sensitive process because of the easy of sample degradation and the distance that many bodies of freshwater to analyze are from the location of laboratories.

In this thesis, it was developed a unmanned surface vehicle prototype – boat – with locomotion in aquatic environment, capable of carrying laboratory equipment for collection and analysis of water in dams, lakes and rivers with weak currents. The prototype is controlled remotely by an operator, it has the capacity to communicate data by radio frequency (RF), geolocation system and it is energetically autonomous.

The results obtained demonstrate that the locomotion, communication, geolocation and energy autonomy systems were developed and implemented successfully.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas.....	ix
Acrónimos	xi
Capítulo I – Introdução	1
1.1 Enquadramento do trabalho.....	2
1.2 Motivação.....	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Estrutura do documento.....	4
Capítulo II – Estado da Arte	7
2.1 Embarcações aquáticas não tripuladas	8
2.1.1 Bluetooth Baitboat	9
2.1.2 ESM30	11
2.1.3 Heron.....	13
2.1.4 Comparação dos sistemas apresentados.....	16
2.2 Elementos hardware embarcação	17
2.2.1 Propulsão.....	17
2.2.2 Módulo Comunicação RF	26
2.2.3 Geolocalização	29
Capítulo III – Descrição do Problema e Arquitetura do Sistema	31
3.1 Descrição do Problema.....	32
3.1.1 Requisitos.....	35
3.2 Solução Proposta	36
3.2.1 Arquitetura da Solução.....	36
3.2.2 Módulos do Sistema.....	38
3.2.3 Características	39
3.3 Funcionamento	41

3.3.1 Comunicação.....	41
3.3.2 Monitorização Energética	42
3.3.3 Formato Mensagens	42
3.3.4 Estados de Funcionamento.....	44
Capítulo IV – Hardware e Firmware	47
4.1 Hardware	48
4.1.1 Blocos Hardware do Sistema	48
4.1.2 Sistema Computacional.....	49
4.1.3 Módulo RF	50
4.1.4 Módulo Geolocalização	51
4.1.5 Propulsor	51
4.1.6 Motor.....	52
4.1.7 ESC – Controlador Motor	53
4.1.8 Servo	54
4.1.9 Comando	55
4.1.10 Alimentação	55
4.1.11 Protótipo	57
4.2 Firmware	59
4.2.1 Máquina de Estados	59
4.2.2 Inicialização μ C e módulos de hardware	60
4.2.3 Estrutura de Dados	61
4.2.4 Velocidade e Direção	61
4.2.5 Comando	64
4.2.6 Geolocalização	65
4.2.7 Comunicação.....	69
4.3 Custo da Solução	75
4.3.1 Sistema propulsão e direção.....	75
4.3.2 Circuitos integrados e componentes passivos	75
4.3.3 Periféricos	76
4.3.4 Outros componentes.....	76
Capítulo V – Resultados e Análise	77
5.1 GPS.....	78
5.1.1 Resultados	78
5.1.2 Análise	79

5.2	Comunicação	79
5.2.1	Resultados	79
5.2.2	Análise	84
5.3	Consumos Energéticos	85
5.3.1	Resultados	85
5.3.2	Análise	87
5.4	Usabilidade e Desempenho	88
5.4.1	Resultados	88
5.4.2	Análise	89
5.5	Sistema	89
5.5.1	Resultados	89
5.5.2	Análise	90
Capítulo VI – Conclusões e Trabalho Futuro.....		91
6.1	Conclusões	92
6.2	Trabalho Futuro	94
Bibliografia		95
Apêndice A.....		101
A.1	Funcionamento Motor DC.....	101
A.2	Funcionamento Motor BLDC.....	104

Índice de Figuras

Figura 2.1.1 – a) Comando Bluetooth Baitboat; b) Bluetooth Baitboat (Adaptado de [6])	9
Figura 2.1.2 – Menu principal da aplicação móvel ND Baitboat (Adaptado de [6])	10
Figura 2.1.3 – ESM30 (Adaptado de [7]).....	11
Figura 2.1.4 – a) Comando ESM30; b) Estação base ESM30 (Adaptado de [7]).....	12
Figura 2.1.5 – Exemplos planificação de rotas no software da estação base do ESM30 (Adaptado de [7]).....	12
Figura 2.1.6 – Heron (Adaptado de [8]).....	14
Figura 2.1.7 – Comando comercial Futaba (Adaptado de [8]).....	14
Figura 2.1.8 – Arquitetura Heron (Adaptado de [9])	15
Figura 2.2.1 – a) Propulsor Water Jet; b) Propulsor Hélice (Adaptado de [16]).....	17
Figura 2.2.2 – a) Ilustração propulsor Water Jet; b) Ilustração propulsor Hélice (Adaptado de [17])	18
Figura 2.2.3 – Ilustração sistema mudança direção em diversas configurações: a) Mono propulsor com leme; b) Propulsor duplo; c) Mono propulsor acoplado a eixo vertical	18
Figura 2.2.4 – a) Bocal de inversão Water Jet desativado, movimento para a frente; b) Bocal de inversão Water Jet ativado, movimento para a trás (Adaptado de [18])	19
Figura 2.2.5 – Elementos constituintes de motores DC brushed e brushless (Adaptado de [19]) ...	20
Figura 2.2.6 – Ilustração das forças, F , aplicadas a uma espira percorrida por uma corrente, I , na presença de um campo magnético, B . (Adaptado de [19]).....	21
Figura 2.2.7 – Representação de motor DC de 2 polos e um enrolamento. (Adaptado de [19]).....	21
Figura 2.2.8 – Ilustração de esquema de funcionamento circuito Ponte-H (Adaptado de [22])	22
Figura 2.2.9 – Ilustração de motor BLDC de 2 polos fazendo uso de apenas 1 enrolamento a cada instante (Adaptado de [23]).....	23
Figura 2.2.10 – a) Controlador ESC; b) Esquema controlo alimentação dos enrolamentos do estator (Adaptado de [25] e [26]).....	24
Figura 2.2.11 – a) Motor BLDC inrunner; b) Motor BLDC outrunner (Adaptado de [27])	25

Figura 2.2.12 – Motor de combustão interna de modelo rádio controle (Adaptado de [28]).....	26
Figura 2.2.13 – Modulo comunicação RF (Adaptado de [29])	27
Figura 2.2.14 – Modulo localização sistema GNSS (Adaptado [30]).....	29
Figura 3.1.1 – a) Sistema básico de pequenas dimensões de monitorização de qualidade da água; b) Boia de grandes dimensões para monitorização de qualidade da água (Adaptado de [31] e [32])..	32
Figura 3.1.2 – Recolha de amostra de água através de embarcação aquática tripulada (Adaptado de [33]).....	33
Figura 3.1.3 – Exemplo corpo de água doce - Barragem Aguieira, Tábua	34
Figura 3.2.1 - Esboço da solução proposta.....	36
Figura 3.2.2 - Diagrama blocos da solução proposta	37
Figura 3.3.1 – Ilustração de exemplo de quebra de comunicação entre módulos e processo de restabelecimento da mesma.....	41
Figura 3.3.2 – Formato genérico de mensagem enviada pelo módulo principal.....	42
Figura 3.3.3 – Formato genérico de mensagem enviada pelo módulo secundário.....	42
Figura 3.3.4 – Informação transmitida na mensagem periódica enviada pelo módulo principal.....	44
Figura 3.3.5 – Informação transmitida na mensagem de resposta enviada pelo módulo secundário.....	44
Figura 3.3.6 – Fluxograma com atividades efetuadas no estado Normal.....	45
Figura 3.3.7 – Fluxograma com atividades efetuadas no estado Energia	45
Figura 3.3.8 – Fluxograma com atividades efetuadas no estado AutoNavegação	45
Figura 4.1.1 – Diagrama de blocos hardware módulo secundário	48
Figura 4.1.2 – Diagrama de blocos hardware módulo principal	49
Figura 4.1.3 – Placa de desenvolvimento - DETPIC32	49
Figura 4.1.4 – Transceiver - nRF24L01+.....	50
Figura 4.1.5 – Módulo GPS - u-blox NEO-6M.....	51
Figura 4.1.6 – Propulsor - KMB JET28	52
Figura 4.1.7 – Motor BLDC - 3670 4POLES 2150kv	52
Figura 4.1.8 – ESC - HobbyKing 120A ESC 4A UBEC	53
Figura 4.1.9 – Diagrama controlo ESC com variação duty-cycle.....	54

Figura 4.1.10 – a) TowerProMG996R; b) Diagrama controlo servo com variação duty-cycle (Adaptado de [44])	55
Figura 4.1.11 – a) Joystick; b) Esquemático ligações e composição joystick (Adaptado de [45]) ..	55
Figura 4.1.12 – a) Bateria Li-Po - Turnigy 3s 5000 mAh; Bateria Li-Po - Turnigy 1s 2000 mAh..	56
Figura 4.1.13 – a) Diagrama blocos alimentação módulo principal; b) Diagrama blocos alimentação módulo secundário	57
Figura 4.1.14 – a) Protótipo I; b) Teste protótipo I em ambiente laboratorial	57
Figura 4.1.15 – Protótipo II.....	58
Figura 4.2.1 – Diagrama de estados módulo principal.....	59
Figura 4.2.2 – Diagrama de estados módulo secundário.....	60
Figura 4.2.3 – Diagrama de blocos das configurações de inicialização do ESC.....	62
Figura 4.2.4 – Diagrama de blocos do algoritmo de controlo de direção, sentido e velocidade	63
Figura 4.2.5 – Diagrama de blocos comando.....	65
Figura 4.2.6 – Estrutura e exemplo de mensagem RMC do protocolo NMEA (Adaptado de [20])	66
Figura 4.2.7 – Diagrama de blocos do algoritmo de receção e armazenamento dos dados de geolocalização	67
Figura 4.2.8 – Diagrama do algoritmo de parsing de mensagens geolocalização.....	68
Figura 4.2.9 – Diagrama de blocos do transceiver nRF24L01 ⁺ (Adaptado de [37]).....	69
Figura 4.2.10 – Máquina de estados do bloco Radio Control (Adaptado de [37]).....	71
Figura 4.2.11 – Pacote comunicação ShockBurst TM com payload variável [1 - 32] bytes.....	72
Figura 4.2.12 – Composição detalhada mensagens geolocalização enviadas pelo módulo secundário	73
Figura 4.2.13 – Composição detalhada mensagens locomoção enviadas pelo módulo principal	73
Figura 4.2.14 – a) Algoritmo de envio de mensagem; b) Algoritmo de receção de mensagem.....	74
Figura 5.2.1 – Imagem aérea com relevo do local do teste II - Barragem Aguieira, Tábua	80
Figura 5.2.2 – Número pacotes recebidos em função da distância em terreno irregular - Teste I ...	80
Figura 5.2.3 – Imagem aérea local do teste II – Parque Verde do Mondego, Coimbra	81
Figura 5.2.4 – Número pacotes recebidos em função da distância em zona com redes Wi-Fi - Teste II	81

Figura 5.2.5 – Imagem aérea local teste III, IV, V e VI - CAR (Centro Alto Rendimento) de Montemor-o-Velho	82
Figura 5.2.6 – Número pacotes recebidos em função da distância. Taxa transmissão: 250 Kbps - Teste III	82
Figura 5.2.7 – Número pacotes recebidos em função da distância. Taxa transmissão: 1 Mbps - Teste IV	82
Figura 5.2.8 – Número pacotes recebidos em função da distância. Taxa transmissão: 2 Mbps - Teste V	83
Figura 5.2.9 – Número pacotes recebidos em função da distância - Teste VI	83
Figura 5.3.1 – Corrente instantânea em função da potência fornecida ao motor sem carga	86
Figura 5.4.1 – Teste protótipo II em ambiente aquático com presença de ervas.....	88
Figura A.1.1 – Ilustração das forças, F , aplicadas a uma espira percorrida por uma corrente, I , na presença de um campo magnético, B . (Adaptado de [19]).....	101
Figura A.1.2 – Regra da mão esquerda de Fleming's, que estabelece a relação entre I , B e F_m (Adaptado de [20] e [21]).....	102
Figura A.1.3 – Representação de motor DC de 2 polos e um enrolamento. (Adaptado de [19])...	103
Figura A.2.1 – Ilustração de motor BLDC de 2 polos fazendo uso de apenas 1 enrolamento a cada instante (Adaptado de [23]).....	104
Figura A.2.2 – Ilustração de motor BLDC de 2 polos fazendo uso de 2 enrolamentos a cada instante (Adaptado de [23])	105
Figura A.2.3 – Ilustração ligação enrolamentos em formato estrela (Adaptado de [24])	105

Índice de Tabelas

Tabela 2.1.1 – Exemplos de embarcações aquáticas de superfície não tripuladas	8
Tabela 2.1.2 – Principais características do sistema Bluetooth Baitboat	10
Tabela 2.1.3 – Principais características do sistema ESM30	13
Tabela 2.1.4 – Principais características do sistema Heron	16
Tabela 3.3.1 – Tipos de erros dependendo do código de erro apresentado.....	43
Tabela 3.3.2 – Tipos de erros dependendo do código de erro apresentado.....	43
Tabela 3.3.3 – Informação solicitada dependendo do código de informação apresentado	44
Tabela 4.2.1 – Frequência timers, valores de OCRS e Offset para servos e ESC/Motor.....	62
Tabela 4.2.2 – Tipo de mensagens do protocolo NMEA e campos mais relevantes de cada uma...	66
Tabela 4.2.3 – Exemplo de coordenadas geográficas representadas no formato decimal degrees ..	68
Tabela 4.3.1 – Custo sistema propulsão que integra a solução proposta	75
Tabela 4.3.2 – Custo dos circuitos integrados e componentes passivos que integram a solução proposta.....	75
Tabela 4.3.3 – Custo dos periféricos que integram a solução proposta	76
Tabela 4.3.4 – Custo componentes que integram a solução proposta	76
Tabela 5.1.1 – Tempo aquisição de sinal do modo Cold Start e Hot Start.....	78
Tabela 5.1.2 – Erro posição em função do número de satélites utilizados para adquirir a localização	79
Tabela 5.2.1 – Configurações módulo nRF24L01+ para cada teste	80
Tabela 5.3.1 – Consumo energético μC e módulos GPS e RF.....	85
Tabela 5.3.2 – Consumo energético servo para diferentes estados	86
Tabela 5.3.3 – Consumo energético e percentagem de tempo a ON de cada componente para o módulo principal (M.P.) e módulo secundário (M.S.)	87

Tabela 5.4.1 – Parâmetros mesuráveis desempenho embarcação	88
Tabela 5.5.1 – Principais características do protótipo II	89
Tabela A.2.1 – Enrolamentos ativos e sentido da corrente consoante os terminais conectados e a polarização destes.....	106

Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> Conversão Analógico-Digital
BEC	<i>Battery eliminator circuit</i> Circuito Eliminador de Bateria
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i> Corrente contínua sem Escovas
DC	<i>Direct Current</i> Corrente Contínua
ESC	<i>Electronic Speed Control</i> Controlador Eletrónico de Velocidade
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS	<i>Global Position System</i> Sistema de Posicionamento Global
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> Industrial, Científica e Médica
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> Sistema de Varredura a Laser
Li-PO	<i>Lithium Polymer Battery</i> Bateria Polímero de Lítio

LSB	<i>Least Significant Bit</i> dor Bit Menos Significativo
Mbps	<i>Mega Bits Per Second</i> Mega Bits Por Segundo
MISO	<i>Master Input Slave Output</i> Entrada Mestre Saída Escravo
MOSI	<i>Master Output Slave Input</i> Saída Mestre Entrada Escravo
NFC	<i>Near Field Communication</i> Comunicação por Campo de Proximidade
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i> Associação Nacional de Eletrónica Marinha
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> Modelação por Largura de Pulso
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> Placa de Circuito Impresso
RF	<i>Radio Frequency</i> Radiofrequência
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> Posicionamento Cinemático em Tempo-Real
SPI	<i>Serial Peripheral Interface Bus</i> Barramento de Interface Série de Periféricos
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> Comunicação Série Assíncrona
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i> Veículo de Superfície não Tripulado

Capítulo I

Introdução

Sumário

Neste capítulo será realizado o enquadramento do trabalho, descrita a motivação para o desenvolvimento da dissertação, quais os objetivos a que a mesma se propõe e por último será descrita a estrutura do documento.

1.1 Enquadramento do trabalho

O crescimento demográfico mundial aliado ao crescimento dos padrões de qualidade de vida da sociedade, conduziu a um aumento da exploração e consumo de recursos naturais do planeta Terra. A exploração massiva de recursos, os processos de transformação da matéria prima e os resíduos resultantes do consumo humano têm um grande impacto no meio ambiente, provocando em diversos casos danos irreversíveis, tais como a perda de biodiversidade e a contaminação de diversos ecossistemas. Devido aos fatores supracitados torna-se inevitável repensar a relação do Homem com a natureza, sendo crucial perceber quais os seus limites, reduzir os impactos negativos provocados pela atividade humana, preservar os ecossistemas e tentar recuperar aqueles que se encontram degradados.

Os ecossistemas aquáticos geram especial preocupação dada a sua extrema sensibilidade e importância. Para além de milhares de espécies vegetais, animais e microrganismos que dependem dos ecossistemas aquáticos para sobreviver, é também destes que o ser humano retira um recurso essencial à sua sobrevivência, a água. O planeta Terra tem cerca de 70% da sua superfície coberta por água, no entanto aproximadamente 97% desta é água salgada, sendo, portanto, imprópria para uso humano. A água doce - água apropriada ao uso humano - representa apenas cerca de 3% da água do planeta, encontrando-se cerca de 2/3 congelada em glaciares e calotas polares. A restante água doce divide-se entre aquíferos, lagos, reservatórios e rios, sendo que parte desta se encontra imprópria para atividades humanas, tais como agricultura, exploração pecuária e consumo [1][2][3].

Atualmente são várias as zonas do globo a enfrentar problemas relacionados com a falta de água para uso humano, estimando-se que em todo o mundo vivam 2.1 mil milhões de pessoas sem acesso água potável em suas casas [4]. Devido a todos os fatores anteriormente mencionados é cada vez mais importante monitorizar os diversos corpos de água, analisando para o efeito variados parâmetros que permitem aferir a qualidade da água. Tipicamente, a qualidade da água, é definida pela concentração de nutrientes, substâncias orgânicas e sais que nela se encontram dissolvidos. Atualmente são vários os métodos utilizados para fazer essa medição, sendo que por norma a amostra é recolhida no local e transportada para o laboratório para que a análise seja efetuada.

Há um grande interesse no desenvolvimento de novas soluções que permitam fazer uma monitorização de corpos de água doce, visto serem aqueles a que mais se recorre para fins agrícolas, criação animal e abastecimento de populações. O ACQUA_{VARD} é uma patente de

invenção nacional, com o Nº 107219, para um dispositivo navegável autónomo não tripulado que contem uma unidade para auto-análise e quantificação de parâmetros de qualidade da água insitu, em barragens, lagos e rios [5]. Nesta dissertação será desenvolvido um protótipo de um instrumento móvel para o sistema ACQUA_{VARD}, tendo esse protótipo como objetivo transportar um laboratório de medição de qualidade de água.

1.2 Motivação

A presente dissertação tem como motivação o estudo e desenvolvimento de um instrumento móvel telecomandado com forma de barco para a patente ACQUA_{VARD}, sistema que visa simplificar o processo de recolha e análise de amostras de água realizado por biólogos e outros profissionais em meio aquático.

São diversos os métodos de análise de água existentes, assim como se encontram disponíveis no mercado variados instrumentos de análise, tanto para medições de campo como para contexto laboratorial, sendo possível através destes analisar os mais diversos indicadores que permitem aferir a qualidade da água. Estes equipamentos exigem alguma logística associada à recolha e análise, desde logo todas as análises realizadas em laboratório requerem a conservação e transporte das amostras até ao mesmo, sendo este um processo delicado dada a facilidade de degradação das amostras e a distância a que muitos destes corpos de água se encontram dos laboratórios. As medições realizadas com instrumentos portáteis de campo não se debatem com nenhum dos problemas anteriormente descritos, no entanto, os equipamentos apresentam especificações bastante inferiores aquelas que são apresentadas por equipamentos laboratoriais. Ambos os métodos obrigam muitas vezes a enfrentar um problema de logística considerável, a necessidade de uma embarcação aquática tripulada para efetuar recolhas manuais de amostras dentro do corpo de água. Por conseguinte, não há no mercado nenhuma ferramenta que concilie mobilidade, facilidade de recolha, rapidez de análise e fiabilidade dos resultados.

A solução desenvolvida deve possuir características, tais como robustez, fácil manobrabilidade, dimensões adequadas para que possa ser facilmente transportado numa bagageira de média dimensão de um automóvel e preços atrativos de aquisição e operação relativamente às soluções que atualmente existem no mercado.

1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver a componente de *hardware* e *firmware* de um protótipo de um sistema móvel aquático de superfície não tripulado, capaz de transportar um equipamento laboratorial de recolha e análise de água em barragens, lagos e rios com fracas correntes. O sistema móvel deve ter locomoção própria em ambiente aquático, autonomia energética, comunicação sem fios a longas distâncias, geolocalização e ser comandado via controlo remoto.

Face ao objetivo mencionado no paragrafo anterior, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- Implementar uma tecnologia de comunicação que garanta a transmissão de dados e controlo a longas distâncias;
- Projetar e implementar uma solução que garanta a locomoção, direção e sentido do sistema através de um conjunto de atuadores;
- Implementar sistema de geolocalização;
- Desenvolver *firmware* que efetue o controlo de todos os elementos de *hardware* e processe a informação por estes transmitida;
- Desenvolver um protótipo funcional que agregue a solução projetada a nível de atuadores, comunicação, fonte energética e geolocalização, e que permita realizar testes em meio aquático;
- Testar e validar o funcionamento do protótipo desenvolvido.

1.4 Estrutura do documento

O presente documento está estruturado do seguinte modo:

- **Capítulo 1: Introdução** – Descrição e enfatização da importância de monitorização da qualidade da água em corpos de água utilizados para uso humano;
- **Capítulo 2: Estado da Arte** – Enquadramento teórico das principais soluções existentes no mercado ao nível de embarcações aquáticas não tripuladas, sistemas de propulsão, comunicação sem fios e geolocalização que se enquadram neste contexto;

- **Capítulo 3:** *Descrição do problema e Arquitetura do Sistema* – Neste capítulo é realizada uma descrição do problema a resolver e posteriormente uma breve exposição da arquitetura do sistema a ser desenvolvido, bem como as suas características e funcionalidades;
- **Capítulo 4:** *Hardware e Firmware* – Descrição de todos os blocos de *hardware* pelos quais o sistema é composto e das implementações feitas ao nível de *firmware*;
- **Capítulo 5:** *Resultados e Análise* – Apresentação e análise dos resultados práticos obtidos nos testes realizados ao sistema;
- **Capítulo 6:** *Conclusões e Trabalho Futuro* – Análise e reflexão de todo o trabalho realizado nesta dissertação por forma a concluir se os resultados obtidos satisfazem os objetivos inicialmente propostos. Neste capítulo são ainda propostas melhorias e sugestões de trabalho a realizar no futuro.

Capítulo II

Estado da Arte

Sumário

No presente capítulo serão abordadas as principais soluções de embarcações aquáticas não tripuladas de pequenas dimensões existentes no mercado. A secção final encontra-se destinada à análise de tecnologias que estarão presentes nesta dissertação, entre as quais o sistema de propulsão, comunicação e geolocalização.

2.1 Embarcações aquáticas não tripuladas

No correr dos últimos anos tem havido um interesse crescente na utilização e desenvolvimento de embarcações robóticas para a exploração e estudo de corpos de água. O uso destas embarcações facilita a realização de tarefas consideradas complexas e perigosas para humanos, torna mais fácil atingir determinadas zonas, aumenta a eficiência de realização de tarefas e permite o desenvolvimento e implementação de sistemas para aquisição e transmissão de dados aquáticos.

Existem atualmente no mercado diversas embarcações aquáticas de superfície não tripuladas, também denominadas USV (*Unmanned Surface Vehicle*). A oferta inclui embarcações para recreação, competição, investigação, uso comercial e militar. Estas embarcações apresentam uma gama de preços bastante abrangente, variando este consoante a finalidade a que se destinam, as características e a quantidade de funcionalidades que apresentam. A Tabela 2.1.1 apresenta alguns exemplos de USVs existentes no mercado.

Dimensões (m)	Sistema	Finalidade
Pequenas (menor que: [1.5 x 1 x 0.5])	Bluetooth Bait Boat [6]	Recreação - Pesca
	ESM30 [7]	Exploração Científica e Monitorização
	Heron [8]	Exploração Científica e Monitorização
Médias (entre: [1.5 x 1 x 0.5] e [5 x 2.5 x 2])	M40 [10]	Patrulha e Segurança
	C-Worker 4 [11]	Exploração Científica e Monitorização
	CAT-Surveyor [12]	Exploração Científica
Grandes (maior que: [5 x 2.5 x 2])	L30 [13]	Combate a fogos e resgate
	Seagull [14]	Militar
	B-7 [15]	Patrulha e Monitorização

Tabela 2.1.1 – Exemplos de embarcações aquáticas de superfície não tripuladas

Nas secções seguintes, 2.1.1 a 2.1.4, serão abordadas embarcações aquáticas de superfície não tripuladas de pequenas dimensões, visto serem as que se enquadram no âmbito da dissertação. De modo oferecer uma visão mais abrangente dos sistemas existentes no mercado será efetuada uma exposição das características e funcionalidades de três embarcações: uma direcionada para recreação (Bluetooth Bait Boat) e duas direcionadas para a exploração científica e investigação, sendo uma delas uma plataforma completa mas pouco configurável (ESM30) e a outra uma plataforma *open source* (Heron).

2.1.1 Bluetooth Baitboat

O Bluetooth Baitboat é uma embarcação USV comercializado pela companhia *New Direction Tackle*, direcionado para o mercado “hobbista” da pesca e que tem como finalidade o transporte e libertação de isco em corpos de água calmos [6].

Este dispositivo é alimentado por um sistema de baterias recarregáveis, está equipado com um sistema de propulsão elétrico duplo e geolocalização por GPS. O sistema é controlado via controlo remoto sem fios por um comando de pequenas dimensões e possui também um sistema de navegação autónoma. O comando e o barco encontram-se representados na Figura 2.1.1 a) e b), respetivamente.



Figura 2.1.1 – a) Comando Bluetooth Baitboat; b) Bluetooth Baitboat (Adaptado de [6])

Através do comando é possível controlar manualmente os movimentos do barco por meio de um *joystick*, efetuar calibrações, controlar luzes e guardar até quatro localizações do barco. Após ter pelo menos uma localização guardada, é possível acionar, através de um botão, a deslocação do barco de forma autónoma para essa mesma localização. O comando tem também um botão “*Home*” ao qual pode associar uma determinada localização para a qual o barco se ira deslocar de forma autónoma sempre que este for pressionado. O comando é ainda capaz de informar, através de luzes LED e avisos sonoros, o estado do sinal GPS e da bateria do barco e do próprio comando.

O sistema tem uma aplicação móvel para *smartphone*, *ND Baitboat*, através da qual é possível fazer uso das funções de navegação autónoma de forma mais intuitiva e com recurso a informação visual de localização e velocidade do barco em tempo real (Figura 2.1.2). Através deste sistema é possível efetuar todas as ações que o comando disponibiliza, exceto o controlo da navegação

manual. A comunicação entre o *smartphone* e o sistema é realizada através de ligação *bluetooth* com o comando, estabelecendo este a ponte de comunicação com o barco.

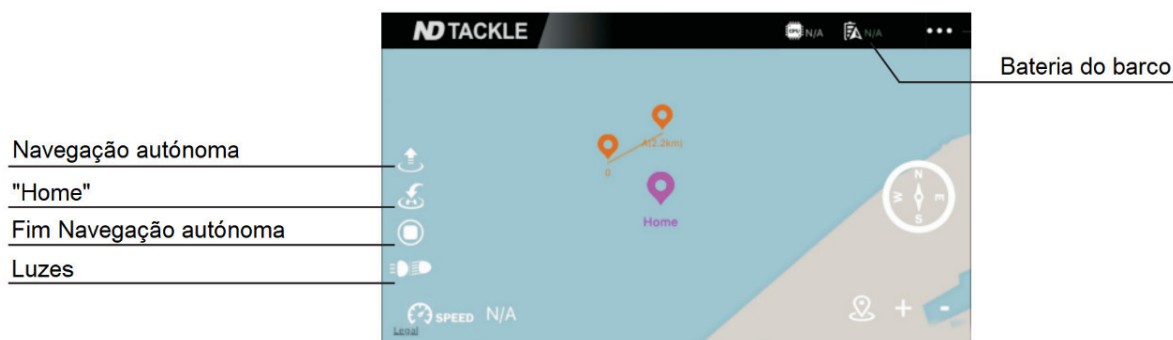


Figura 2.1.2 – Menu principal da aplicação móvel ND Baitboat (Adaptado de [6])

De forma a evitar que a embarcação fique à deriva no corpo de água, o sistema retorna de forma automática para a localização definida como “Home” caso a bateria atinja baixos níveis de energia ou ocorra uma quebra de comunicação.

Na Tabela 2.1.2 encontram-se as características mais relevantes do sistema.

Massa		7.5 kg	
Tipo de casco		Catamarã	
Dimensões		Barco	56 x 40 x 24 cm
		Comando	20 x 3 x 3 cm
Comunicação	Controlo remoto	Tecnologia	RF – 2.4 GHz
		Alcance	300 m
	Dados	Tecnologia	RF – 2.4 GHz
		Alcance	300 m
	Vídeo	Não aplicável	-
	Bateria barco		Tecnologia
Tensão			14.8 V
Capacidade			15 (2x7.5) Ah
Autonomia			[4 – 5] horas 10 Km
Sistema propulsão		Motor	2 x BrushlessMotor
		Propulsor	2 x Water Jet
		Velocidade max.	Inf. não disponível
Operação		Navegação	Manual / Autónoma
		Controlo	Comando / Smartphone
Geolocalização		GPS	
Preço sistema		1070 €	

Tabela 2.1.2 – Principais características do sistema Bluetooth Baitboat

De realçar a excelente autonomia do equipamento, a usabilidade, as características físicas que permitem um transporte fácil e o sistema de propulsão anti ervas e seguro para todos os seres vivos

que possam estar presentes no corpo de água. O sistema possui outras funcionalidades para além das apresentadas, no entanto, estas não foram consideradas relevantes para a discussão.

2.1.2 ESM30

O ESM30 é um sistema USV comercializado pela empresa *Oceanalpha* e é direcionado para exploração científica e resposta rápida em caso de acidente ambiental aquático, tendo como finalidade recolha de amostras de água e monitorização da qualidade da água através de medições simples, tais como pH, oxigénio dissolvido e temperatura (Figura 2.1.3) [7].



Figura 2.1.3 – ESM30 (Adaptado de [7])

O sistema é energeticamente independente, sendo a independência garantida através de um sistema de baterias recarregáveis, tem um único propulsor, está equipado com geolocalização por GPS, sistema vídeo e sensores de obstáculos. O controlo do dispositivo é efetuado de forma remota através de um comando, tendo este ainda um sistema navegação autónoma.

O comando (Figura 2.1.4 a)) permite efetuar o controlo manual da movimentação do barco através de dois *joysticks*, tem um *display* LCD de 4.3 polegadas através do qual é possível visualizar informações, tais como as coordenadas geográficas do barco em tempo real, estado de ligação da comunicação e o estado da bateria do barco e comando. Através do comando é ainda possível efetuar o controlo de alguns atuadores, como por exemplo, o mecanismo de recolha de amostras de água.

Juntamente com o sistema pode ser adquirida uma estação base à prova de água (Figura 2.1.4 b)) na qual se podem delinear, através de interface gráfica (Figura 2.1.5), rotas de navegação destinadas a serem realizadas em piloto automático com a finalidade de serem efetuadas recolhas

de água ou medições de determinados parâmetros. Através da estação base é possível receber vídeo em tempo real da camera instalada no ESM30, bem como dados de geolocalização, velocidade, estado de bateria, tempo restante para o término da atividade e dados de monitorização. Em alternativa à estação base o *software* de planeamento e controlo da *Oceanalpha* para a estação base pode ser instalado num computador comercial com sistema operativo Windows XP ou superior.



Figura 2.1.4 – a) Comando ESM30; b) Estação base ESM30 (Adaptado de [7])



Figura 2.1.5 – Exemplos planificação de rotas no software da estação base do ESM30 (Adaptado de [7])

Os sensores de obstáculos do ESM30, baseados em transdutores de ultrassom, permitem detetar objetos a uma distância de 10 metros, evitando assim colisões quando o modo em navegação autónoma se encontra ativo.

Neste sistema o controlo remoto, os dados e o vídeo são enviados por tecnologias diferentes, ao contrário do que se verifica no sistema anterior onde comunicação de dados e o controlo remoto são efetuados pela mesma tecnologia. Através do planeamento de uma rota é possível alcançar localizações até 5 km, um valor consideravelmente superior aos 2 km de alcance do controlo remoto manual. De realçar que os 5 km de alcance de comunicação e os 2 km de transmissão vídeo só são

atingíveis através da utilização de uma estação retransmissora portátil comercializada pela *Oceanalpha*.

A Tabela 2.1.3 apresenta as características mais relevantes do sistema ESM30.

Massa		31 kg	
Tipo de casco		Catamarã	
Dimensões		Barco	115 x 75 x 43 cm
		Comando	Inf. não disponível
Comunicação	Controlo remoto	Tecnologia	RF – 2.4 GHz
		Alcance	2 km
	Dados	Tecnologia	Inf. não disponível
		Alcance	5 km
	Vídeo	Tecnologia	Wi-Fi
		Alcance	2 km
Bateria barco		Tecnologia	Li-Po
		Tensão	14.8 V
		Capacidade	Inf. não disponível
		Autonomia	[3 – 4] horas
Sistema propulsão		Motor	1 x <i>BrushlessMotor</i>
		Propulsor	1x Hélice
		Velocidade max.	1.5 m/s
Operação		Navegação	Manual / Autónoma
		Controlo	Comando / Estação base
Geolocalização		GPS	
Preço sistema		Inf. não disponível	

Tabela 2.1.3 – Principais características do sistema ESM30

Destaca-se deste sistema o longo alcance de comunicação, a transportabilidade e a compatibilidade com diversas sondas multiparâmetro existentes no mercado.

2.1.3 Heron

Heron é uma embarcação USV da companhia *Clearpath*. Este equipamento destina-se a trabalhos de investigação e aplicações de prototipagem rápida que envolvam, entre outros, recolha de amostras de água, monitorização da qualidade da água e mapeamento de bacias de corpos de água. (Figura 2.1.6) [8].

O catamarã tem propulsores *Water Jet* anti erva que garantem a segurança de seres vivos que possam estar presentes no corpo de água, um perfil raso e GPS integrado que permite o acesso a dados de posicionamento. A embarcação possui um compartimento de carga útil para a montagem

de sensores submersíveis ou equipamentos no convés. Os cascos do Heron são dobráveis, o que juntamente com as suas restantes características físicas torna o transporte, o lançamento e a recuperação um processo rápido e fácil. A independência energética do sistema é garantida através de um sistema de baterias recarregáveis que garante até 2.5 horas de autonomia.



Figura 2.1.6 – Heron (Adaptado de [8])

O sistema vem acompanhado de um controlo remoto comercial (Figura 2.1.7) de seis canais, através do qual é possível efetuar o controlo manual do barco e receber dados (tensão da bateria, corrente motor, temperatura, rpm), estando estes dependentes da aquisição de sensores comerciais compatíveis com o comando.



Figura 2.1.7 – Comando comercial Futaba (Adaptado de [8])

O Heron tem um mini PC a bordo com o sistema operativo Ubuntu Linux 16.04 e o ROS Kinetic, um sistema operativo destinado ao desenvolvimento de robôs. Este é o módulo central do sistema ao qual está conectado um microcontrolador responsável pela gestão e controlo dos motores e luzes LED. O mini PC disponibiliza três portas USB, uma porta Ethernet e duas ligações serial assíncronas RS232 (UART). Estas podem ser utilizadas para alimentar e comunicar com

instrumentos como sonares básicos, LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e câmaras. Ao mini PC está conectado um módulo transmissor Wi-Fi que permite a troca de dados com uma estação base através da qual é também possível efetuar o controlo remoto manual do barco. Tal como no sistema ESM30, em alternativa à aquisição e utilização da estação base dedicada do Heron, é possível recorrer a um computador comercial para fazer as suas funções, bastando para isso que computador corra uma versão do sistema operativo Ubuntu e o ROS Kinetic. A arquitetura do sistema Heron encontra-se ilustrada na Figura 2.1.8.

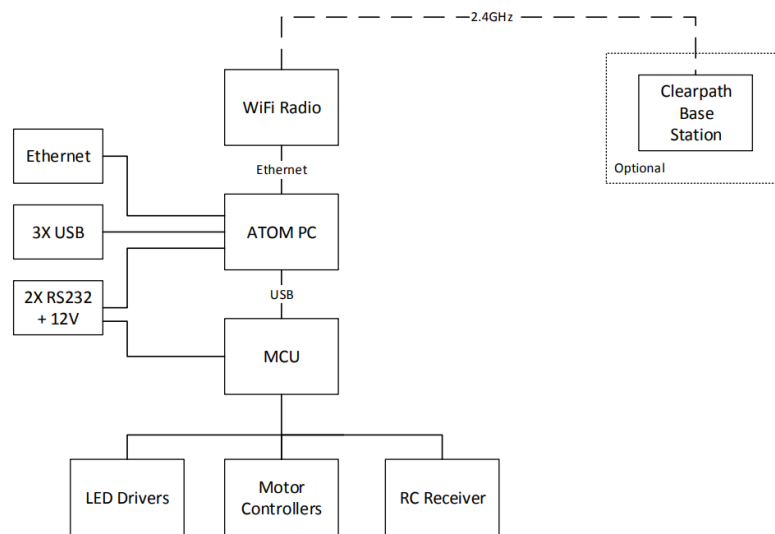


Figura 2.1.8 – Arquitetura Heron (Adaptado de [9])

O código-fonte do Heron é disponibilizado pela *Clearpath* na plataforma de partilha online GITHUB, podendo cada utilizador ajustar o código às suas necessidades ou implementar novas funcionalidades, como por exemplo, navegação autónoma.

Como melhoria e complemento do sistema podem ser adquiridos diversos acessórios de medição e comunicação, destacando-se o sistema de geolocalização com suporte RTK (*Real Time Kinematic*) que permite obter dados de localização com exatidão de 2 cm, e a estação de redes sem fios de longo alcance que permite atingir distâncias de comunicação de até 1 km e implementar o suporte RTK do sistema de geolocalização.

Entre as diversas características do sistema destaca-se a facilidade de transporte e manuseamento, a versatilidade e universalidade do sistema, sendo possível a utilização de diversos tipos de sensores, e ainda o facto de este ser um projeto *open source*, dando desta forma liberdade aos utilizadores para desenvolvimento de *software* adaptado às suas necessidades.

A Tabela 2.1.4 apresenta as características mais relevantes do sistema *Heron*.

Massa			28 kg
Tipo de casco			Catamarã
Dimensões		Barco	135 x 98 x 32 cm
		Comando	23 x 35 x 12 cm
Comunicação	Controlo remoto	Tecnologia	RF – 2.4 GHz
		Alcance	500 m
	Dados	Tecnologia	Wi-Fi
		Alcance	Inf. não disponível
	Vídeo	Não aplicável	-
Bateria barco		Tecnologia	NiMH
		Tensão	14.4 V
		Capacidade	29 Ah
		Autonomia	[2 – 3] horas
Sistema propulsão		Motor	2 x <i>BrushlessMotor</i>
		Propulsor	2 x <i>Water Jet</i>
		Velocidade max.	1.7 m/s
Operação		Navegação	Manual / Autónoma
		Controlo	Comando / Estação base
Geolocalização			GPS
Preço sistema			Inf. não disponível

Tabela 2.1.4 – Principais características do sistema *Heron*

2.1.4 Comparação dos sistemas apresentados

A embarcação Bluetooth Baitboat tem maior autonomia, no entanto, esta deve-se em grande parte as menores dimensões e ao facto de ter uma massa aproximadamente quatro vezes inferior ao Heron e ao ESM30. Ao nível do sistema de propulsão destaca-se o Heron e o Bluetooth BaitBoat, que através do uso de propulsores *Water Jet*, garantem um sistema anti ervas e seguro para os seres vivos que possam estar presentes no corpo de água. O sistema ESM30 apresenta o maior alcance de comunicação, garantindo uma distância duas vezes superior ao sistema Heron e superior a cinco vezes em relação ao sistema Bluetooth Baitboat.

Em suma, a embarcação Bluetooth Baitboat, apesar ser destinada para fins recreativos, apresenta um sistema completo, simples e intuitivo. A embarcação ESM30 é um sistema pronto a utilizar, é bastante completo, totalmente profissional e funcional. A embarcação Heron tem menos soluções desenvolvidas (ex: ausência de navegação autónoma), porem tem a vantagem de ser uma plataforma *open source*, o que possibilita aos utilizadores desenvolver *software* adaptados às suas necessidades.

2.2 Elementos hardware embarcação

As embarcações não tripuladas de pequenas dimensões são compostas por diversos blocos de *hardware*, desde o bloco responsável pela propulsão até ao sistema de geolocalização. Nos pontos seguintes, de 2.2.1 a 2.2.3, será efetuada uma exposição dos blocos de propulsão, geolocalização e comunicação.

2.2.1 Propulsão

Propulsão pode ser definida como a força que impulsiona algo, provocando assim o seu movimento. A movimentação provocada é explicada pela terceira lei de Newton, Princípio da Ação Reação – *Se um corpo exerce uma força sobre outro, este reage e exerce sobre o primeiro uma força de intensidade e direção iguais, mas sentido oposto*. No caso de um barco motorizado a propulsão é feita pela rotação de uma hélice movida por um motor, a hélice exerce uma força sobre a água/ar, empurrando-a para trás, esta reage exercendo uma força sobre a hélice para a frente, provocando assim o movimento do barco.

O sistema de propulsão de um barco motorizado tem dois elementos principais, o motor e o propulsor, mecanismo que, movido por este, interage com a água e faz o barco mover-se. Nos pontos seguintes irá ser feita uma análise a cada um dos elementos, dando a conhecer as diferentes versões e as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Propulsor

O propulsor é o mecanismo que, movido pelo motor, interage com a água e impele o barco para a frente. Existem no mercado dois tipos de propulsores principais para embarcações não tripuladas de pequenas dimensões: *Water Jet* (Figura 2.2.1 a)) e Hélice (Figura 2.2.1 b)). Em ambos os sistemas o motor é acoplado ao veio do propulsor através de uma transmissão.



Figura 2.2.1 – a) Propulsor Water Jet; b) Propulsor Hélice (Adaptado de [16])

O propulsor Hélice é, tal como o nome indica, composto por uma hélice, termo que designa um conjunto de pás que giram em torno do mesmo eixo. Esta é mergulhada na água, abaixo ou por trás do barco e ao ser movida pelo motor impulsiona-o, fazendo com que este se mova (Figura 2.2.2 b)).

No caso de ser utilizado um único propulsor o controlo da direção é feito por meio de um leme, sendo este controlado através de servomotores de forma direta ou por intermédio de sistemas mecânicos (Figura 2.2.3 a)). O controlo da direção num sistema de um único propulsor também pode ser realizado através da rotação do propulsor por um eixo vertical, tal como acontece no sistema ESM30 apresentado no ponto 2.1.2 do presente capítulo (Figura 2.2.3 c)). Caso sejam utilizados dois propulsores o controlo da direção pode ser realizado através de aceleração assimétrica dos propulsores (Figura 2.2.3 b)).

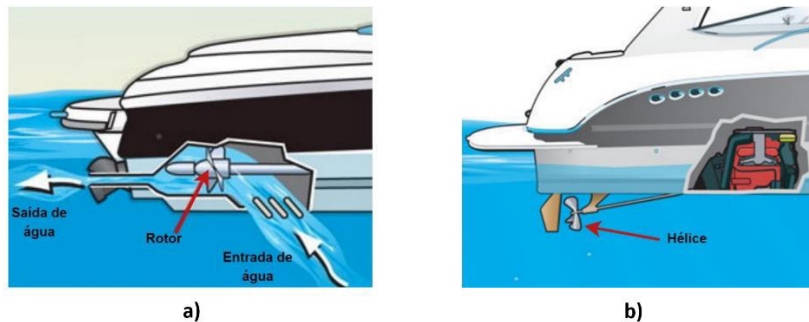


Figura 2.2.2 – a) Ilustração propulsor Water Jet; b) Ilustração propulsor Hélice (Adaptado de [17])

A inversão de sentido do movimento do barco é efetuada através da inversão do sentido de rotação do motor.

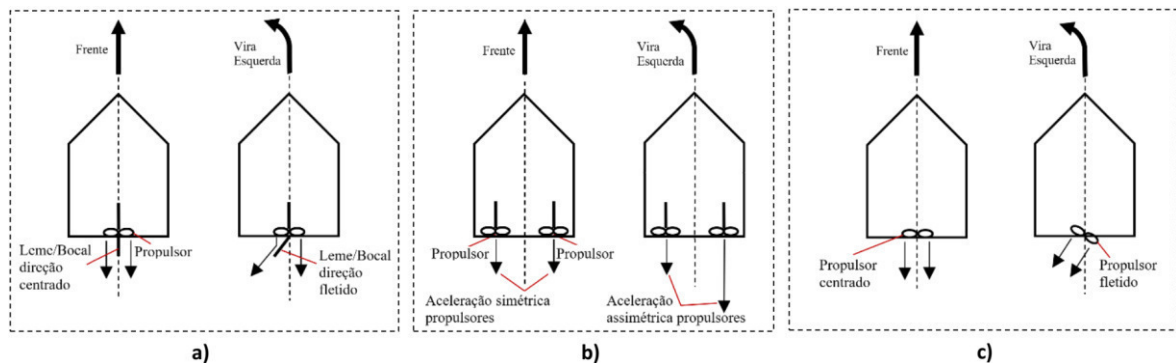


Figura 2.2.3 – Ilustração sistema mudança direção em diversas configurações: a) Mono propulsor com leme; b) Propulsor duplo; c) Mono propulsor acoplado a eixo vertical

Um propulsor *Water Jet* tem um rotor dentro de uma conduta, que ao ser movido pelo motor “aspira” a água na face inferior e “expele-a” pela parte traseira, provocando assim o movimento do

barco (Figura 2.2.2 a)). O controlo da direção num sistema de um único propulsor é efetuado por um bocal que se encontra na extremidade do *Water Jet*, popa do barco, por onde é expelida a água. Tal como no propulsor a hélice, o controlo do bocal pode ser efetuado por meio de servomotores, tanto de forma direta como por intermedio de sistemas mecânicos. Caso o sistema utilize dois propulsores o controlo da direção pode ser efetuado através da aplicação de diferentes acelerações aos propulsores (Figura 2.2.3 b)). A inversão de sentido do movimento é conseguida através da inversão do bocal que se encontra na extremidade do propulsor (Figura 2.2.4).

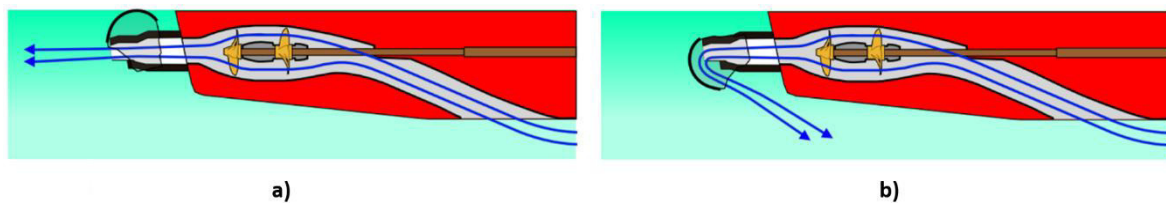


Figura 2.2.4 – a) Bocal de inversão Water Jet desativado, movimento para a frente; b) Bocal de inversão Water Jet ativado, movimento para a trás (Adaptado de [18])

O propulsor *Water Jet*, devido à proteção do elemento rotativo, é mais seguro para nadadores e vida aquática. Este propulsor permite navegar em águas mais rasas, dado que nenhum dos seus elementos vai para além dos limites inferiores do casco e somente a entrada se encontra submersa. Garante ainda grande manobrabilidade, tem uma grande densidade de potência e permite atingir maiores velocidades. Tem como desvantagens o elevado preço, maior manutenção ao longo do tempo e o risco do seu desempenho poder ser afetado por qualquer objeto que interrompa o fluxo de água à unidade de jato, como por exemplo, um saco de plástico sugado para a grade de entrada da unidade de jato pode ter um efeito bastante adverso.

Motor

Os motores são dispositivos que transformam diversas formas de energia em energia mecânica. Existem diversos tipos, formas e dimensões de motores, desde os reduzidos motores elétricos responsáveis pela vibração de um telemóvel, até aos enormes motores de combustão capazes de mover navios de carga.

De seguida será apresentada uma descrição de motores elétricos e de combustão, adequados a barcos de controlo remoto de pequenas dimensões, existentes no mercado

Motores Elétricos

Um motor elétrico é um dispositivo capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica. Estes motores fazem uso das propriedades do eletromagnetismo para, através de forças de repulsão e atração geradas por ímanes e eletroímãs, gerarem movimento. Existem dois grandes grupos de motores elétricos, os motores AC, alimentados por corrente alternada (AC), e os motores DC, alimentados por corrente contínua (DC). É este último grupo que será abordado nos parágrafos seguintes.

Os motores DC, como referido anteriormente, são alimentados por corrente contínua, e tiram partido de propriedades eletromagnéticas para gerar movimento. A velocidade de um motor DC é controlada através da variação da tensão aos seus terminais. Estes motores podem ser encontrados com facilidade em pequenos eletrodomésticos ou aplicações de qualquer casa, automóveis, telemóveis, brinquedos, robótica, indústria, entre outros.

Existe uma grande variedade de motores DC, os principais elementos que compõem um motor DC são apresentados de seguida e podem ser visualizados na Figura 2.2.5.

- Estator – parte estática do motor;
- Rotor – parte rotativa do motor;
- Brush/Escovas – elemento de grafite responsável por conduzir corrente entre a fonte de alimentação e o rotor – exclusivo de motores *brushed*;

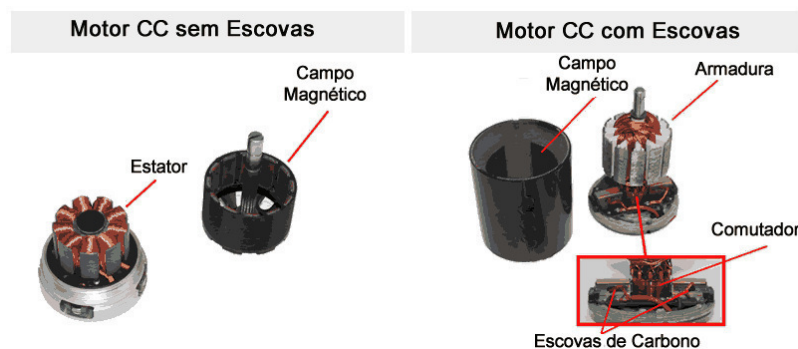


Figura 2.2.5 – Elementos constituintes de motores DC brushed e brushless (Adaptado de [19])

Motor DC

Funcionamento Motor DC

Num motor *brushed* o estator tem ímanes acoplados na sua face interna, criando desse modo um campo magnético constante, \mathbf{B} , que atravessa o rotor (Figura 2.2.6). O rotor é

constituído por um material ferromagnético envolto em enrolamentos condutores (ex: fio de cobre). Esses enrolamentos são bobines de n espiras isoladas entre si, que quando percorridos por uma corrente formam um eletroímã.

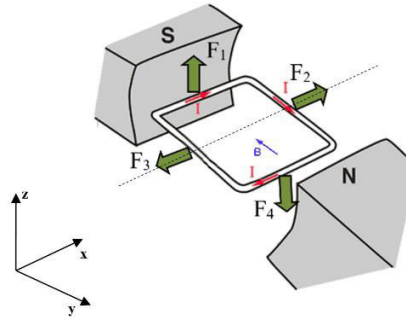


Figura 2.2.6 – Ilustração das forças, F , aplicadas a uma espira percorrida por uma corrente, I , na presença de um campo magnético, B . (Adaptado de [19])

No momento em que o enrolamento em torno de um rotor, que se encontra sob o campo magnético gerado pelo estator, é percorrido por uma corrente elétrica, o rotor move-se. A soma das forças eletromagnéticas no enrolamento gera um torque que resulta na rotação do rotor (Figura 2.2.7).

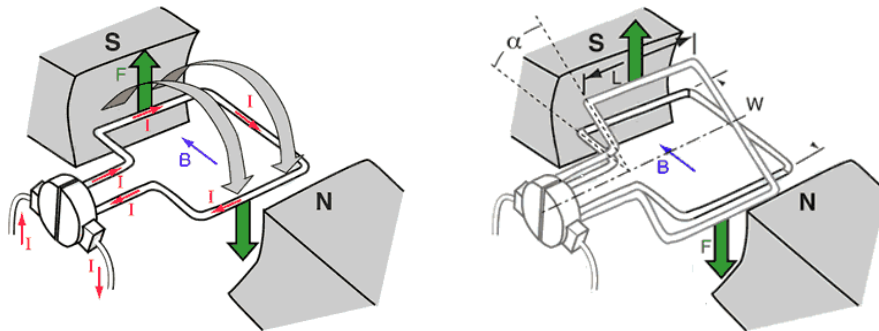


Figura 2.2.7 – Representação de motor DC de 2 polos e um enrolamento. (Adaptado de [19])

De forma a tornar o movimento do rotor uniforme e aumentar o torque, são adicionados n enrolamentos, isolados entre si, em torno do rotor. O rotor tem acoplado a si um anel comutador de forma cilíndrica, este é composto por diversas lamina, isoladas entre si, às quais estão conectados os enrolamentos. Sobre o anel encostam duas escovas, que estão fixas e ligadas aos terminais da fonte de alimentação. A corrente é encaminhada para o enrolamento através do contacto das escovas com o anel comutador. À medida que o rotor se move, ocorre a comutação entre enrolamentos, sendo que a cada meia volta o sentido da corrente na espira inverte, garantindo desse modo continuação do movimento no mesmo sentido.

Mais detalhes sobre o funcionamento do motores DC podem ser encontrados no apêndice A.1.

Controlo Motor DC

Um motor DC tem apenas dois terminais, bastando inverter a polarização desses terminais para que ocorra uma inversão no sentido de rotação. Para efetuar esta inversão, e ser possível controlar o motor de forma eletrônica, existe um circuito denominado de Ponte-H (Figura 2.2.8 a)).

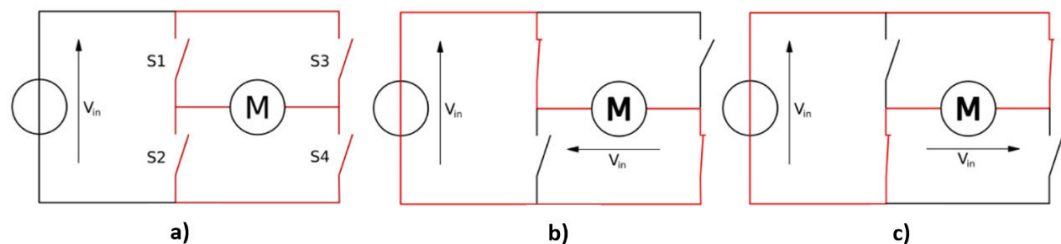


Figura 2.2.8 – Ilustração de esquema de funcionamento circuito Ponte-H (Adaptado de [22])

Ponte-H é um circuito eletrônico constituído por 4 interruptores (S_1, S_2, S_3 e S_4) digitais (ex: Mosfet) ou eletromecânicos (ex: Rele), que tem como principal função controlar o sentido de rotação e velocidade de motores DC. Fechando os interruptores S_1 e S_4 o motor gira num sentido (Figura 2.2.8 b)), abrindo estes e fechando S_2 e S_3 (Figura 2.2.8 c)), gira em sentido contrário. Geralmente o circuito é usado para reverter o sentido de rotação do motor, no entanto, também pode ser utilizado para travar o motor - fechando S_2 e S_4 ou S_1 e S_3 - ou deixar o motor em “roda livre” - abrindo todos os interruptores ou fechando apenas um.

A abertura e fecho dos interruptores pode ser realizada por PWM (*Pulse Width Modulation*), sendo desse modo possível controlar o valor de tensão aos terminais do motor e consequentemente a sua velocidade.

Características Motor DC

Os motores DC, fruto da criação e quebra de circuitos indutivos provocados pela mudança constante dos comutadores através das escovas, criam uma grande quantidade de ruído elétrico e eletromagnético. Esta constante comutação também é responsável por diminuir a eficiência energética destes motores.

Devido ao contacto físico permanente entre as escovas e o anel comutador, estes motores requerem manutenção periódica de limpeza do anel comutador e substituição das escovas de grafite.

Os motores DC têm como vantagem o baixo custo inicial e a alta fiabilidade, fruto da sua simplicidade de funcionamento, e a ainda a simplicidade e baixo custo do sistema controlo.

Motor BLDC

Funcionamento Motor BLDC

Um motor *brushless* de corrente contínua (BLDC), tal como o nome indica, não usa escovas. Ao contrário dos motores DC, estes têm ímanes acoplados ao rotor e é o estator que é constituído por um material ferromagnético envolto em enrolamentos condutores.

Tal como nos motores DC, o seu funcionamento assenta na interação de forças eletromagnéticas, neste caso entre os ímanes do rotor e os eletroímãs do estator. Quando um enrolamento do estator é conectado a uma fonte de alimentação DC, torna-se num eletroímã. Os polos opostos do íman do rotor e do eletroímã do estator são atraídos um pelo outro, forçando o rotor a movimentar-se. De modo a garantir a continuidade do movimento, à medida que os polos do rotor ficam alinhados com os polos do estator, a alimentação passa para o enrolamento seguinte. Visualizando a Figura 2.2.9, percebe-se que quando o rotor alcança o enrolamento **C** a alimentação comuta para o enrolamento **B**, voltando a comutar quando o rotor alcança o enrolamento **B**, desta vez para o enrolamento **A**. Quanto o rotor alcança o enrolamento **A**, perfazendo meia volta, o enrolamento **C** é alimentado com a polaridade oposta. O processo é repetido e o rotor continua o seu movimento de rotação.

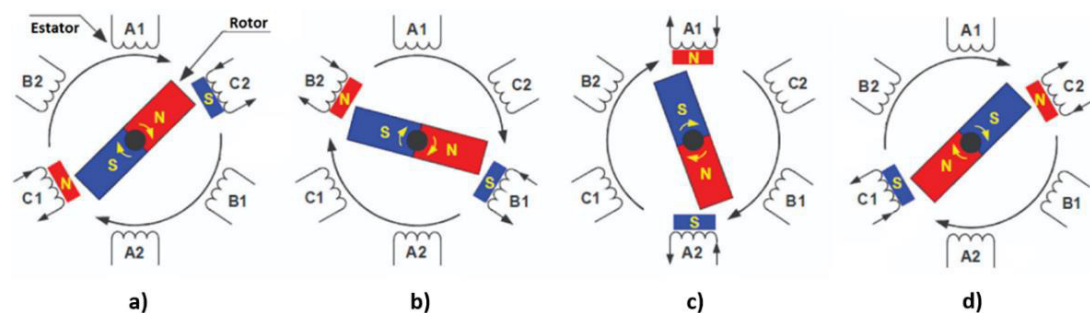


Figura 2.2.9 – Ilustração de motor BLDC de 2 polos fazendo uso de apenas 1 enrolamento a cada instante (Adaptado de [23])

Mais detalhes sobre o funcionamento dos motores BLDC podem ser encontrados no apêndice A.2.

Controlo Motor BLDC

O controlo do motor é efetuado através de um circuito eletrónico chamado ESC (*Electronic Speed Control*) (Figura 2.2.10 a)). Este circuito controla a velocidade do motor através de um sinal de referência disponibilizado por uma fonte externa. O controlo da alimentação dos enrolamentos é feito através de uma rede de transístores.

Para saber quais os enrolamentos a alimentar a cada instante são utilizados sensores que determinam a exata posição do rotor (ex: sensor de *Hall*) (Figura 2.2.10 b)). Através desta informação é possível ao ESC comutar adequadamente a alimentação dos enrolamentos.

Este controlador, para além de permitir o controlo da velocidade, permite inverter o sentido de rotação e travar o motor. Todas estas funções estão pré-programadas e podem ser controladas através de PWM.

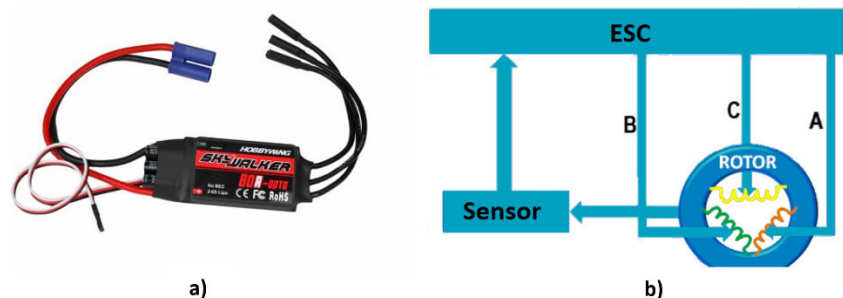


Figura 2.2.10 – a) Controlador ESC; b) Esquema controlo alimentação dos enrolamentos do estator (Adaptado de [25] e [26])

Tipo Motores BLDC

Existem dois tipos de motores BLDC, os *inrunners* e os *outrunners*. Nos motores *inrunners*, o rotor encontra-se no meio do estator, ou seja, na parte interior do motor. Têm uma configuração idêntica à dos motores DC, com a exceção dos imanes e eletroímãs estarem em posições opostas. (Figura 2.2.11 b)).

Os motores *outrunners* têm os imanes do rotor situado na parte exterior do estator. Como se pode verificar pela Figura 2.2.11 a), há um eixo preso no centro do motor que faz a ligação com o rotor e permite que este se mantenha na sua posição.



Figura 2.2.11 – a) Motor BLDC inrunner; b) Motor BLDC outrunner (Adaptado de [27])

Os motores *inrunners* são mais eficientes e atingem maiores rotações por minuto (RPM) que os *outrunners*, no entanto têm um torque inferior a estes e são mais ruidosos.

Características Motor BLDC

Os motores BLDC, fruto da ausência de fricção por contacto entre partes, apresentam uma grande eficiência, longa vida útil, são pouco ruidosos e requerem de pouca ou nenhuma manutenção ao longo do tempo. Estes motores são também conhecidos pela sua fiabilidade e elevada densidade de potência, quando em comparação com os motores de escovas.

Estes motores apresentam como pontos negativos o elevado custo inicial, a complexidade e o elevado custo do sistema de controlo.

Motores Combustão

Um motor de combustão é um dispositivo que transforma energia térmica, obtida através da combustão de combustível, em energia mecânica. A conversão ocorre através de ciclos termodinâmicos que incluem, compressão, aumento de temperatura e expansão de gases.

Existem dois tipos de motores de combustão, os de combustão externa, onde o combustível é queimado numa estrutura externa ao cilindro do motor (ex: motores a vapor), e os de combustão interna, onde a queima do combustível ocorre no interior do cilindro do motor (ex: motores a gasolina). Nos parágrafos seguintes serão abordados os motores de combustão interna.

Como referido anteriormente, os motores de combustão interna tiram partido de propriedades térmicas para gerar movimento. Considerando o princípio de que os gases se expandem quando aquecidos e controlando essa expansão, é possível obter uma pressão capaz de movimentar um elemento do motor, transformando desse modo energia térmica em energia mecânica. A velocidade do motor é controlada através da variação do combustível fornecido ao motor. Estes motores

podem ser encontrados em automóveis, motocicletas, aviões, barcos, máquinas de jardim, brinquedos, indústria, entre outros (Figura 2.2.12).



Figura 2.2.12 – Motor de combustão interna de modelo rádio controle (Adaptado de [28])

Controlo Motor Combustão

O controlo do motor é efetuado de forma mecânica através de um acelerador que varia a quantidade de combustível entregue ao motor e consequentemente a sua velocidade. O controlo do acelerador por ser efetuado por meio de um servomotor.

Nos motores a combustão não é possível inverter o sentido de rotação.

Características Motor Combustão

Os motores de combustão, devido à queima do combustível no seu interior, geram uma grande quantidade de ruído. A queima do combustível resulta ainda na libertação de gases tóxicos para o meio ambiente.

Estes motores apresentam maior complexidade quando comparados com motores elétricos, sendo também mais sensíveis a variações de temperatura. Devido ao contacto físico permanente entre partes do motor e à utilização de líquidos de lubrificação, requerem manutenção periódica de limpeza e substituição de peças de desgaste.

Os motores de combustão apresentam como vantagem a simplicidade e baixo custo do sistema de controlo. Quando comparados com os motores elétricos têm um custo de aquisição inicial mais baixo, contudo a longo prazo têm custos associados mais elevados.

2.2.2 Módulo Comunicação RF

Um módulo RF (Radiofrequência) é um circuito eletrónico utilizado para receber e/ou transmitir ondas rádio a uma de várias frequências disponíveis na banda RF (Figura 2.2.13).

Existem atualmente no mercado diversas soluções de comunicação RF, variando na banda usada na comunicação, taxa de transferência de dados, alcance, formato, consumo energético, preço, entre outros parâmetros.



Figura 2.2.13 – Modulo comunicação RF (Adaptado de [29])

Tecnologias Banda ISM

O espectro das ondas rádio abrange uma faixa de frequências aproximadamente entre os 3 KHz e 300 GHz . Dentro desse espectro existem zonas de frequência não licenciadas, também conhecidas como bandas rádio ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que se referem ao conjunto de bandas rádio reservado ao uso de comunicações RF na área industrial, científica e médica. Este conjunto de bandas pode ser operado por qualquer entidade sem a necessidade de uma licença.

A utilização das bandas rádio ISM apresenta várias vantagens, como a ausência de custos na compra do espectro rádio a utilizar e a rapidez de implementação dada a não necessidade de certificação da rede. Contudo também existem desvantagens, como a alta taxa de ocupação do espectro, que pode provocar um grande nível de interferências, e o facto de nem todas as suas bandas de frequência estarem internacionalmente uniformizadas. Apesar de ser uma zona de frequências livre existem algumas limitações que têm em vista garantir uma utilização equilibrada do meio. Entre elas estão a limitação da potência de transmissão, tipicamente entre 14 e 24 dBm , a limitação de tempo que cada modulo pode ocupar o meio e o curto alcance.

De seguida é apresentada uma brevemente descrição das mais relevantes soluções existentes no mercado que operam nas bandas ISM e permitem a transmissão e receção de dados.

ZigBee

Esta tecnologia é caracterizada pela sua baixa potência de funcionamento, baixa velocidade de transmissão de dados (250 $kbps$) e baixo custo de implementação. Funciona nas frequências 915 MHz e 2450 MHz e tem um alcance reduzido ([0 – 150] m).

Bluetooth

Tecnologia para transmissão de dados a pequenas distâncias ($[0 - 100] \text{ m}$) e razoáveis velocidades de transmissão ($[1 - 50] \text{ Mbps}$). Funciona na banda de frequências de $[2400 - 2483,5] \text{ MHz}$, tem um baixo consumo de energia (30 mA) e baixo custo.

NFC (*Near Field Communication*)

Caracterizado por transferência de dados a muito curtas distâncias ($[0 - 10] \text{ cm}$) e baixas velocidades de transmissão ($[106; 212; 424] \text{ kbps}$). Utiliza a frequência de 13.56 MHz , tem consumo de energia muito baixo (máximo: 15 mA) e baixo custo de implementação.

Wi-Fi

Tecnologia utilizada para transferência de dados a média/longa distância ($[0 - 400] \text{ m}$) e velocidades de transmissão muito elevadas, até 1 Gbps . Utiliza as bandas de frequência $[2,4 - 2,4835] \text{ GHz}$ e $[5,470 - 5,725] \text{ GHz}$. O custo e o consumo energético estão muito dependentes da velocidade de transmissão, podendo variar entre preços/consumos baixos e elevados.

Outras Tecnologias

Para além das tecnologias anteriormente mencionadas há outras tecnologias menos populares. Existem soluções diversas, que funcionam a diferentes frequências, têm baixos consumos, preços reduzidos, longo alcance e velocidades de transmissão intermedias.

O alcance de transmissão de todas as tecnologias descritas está dependente do ambiente onde esta é realizada, sendo que as distâncias indicadas são referentes a condições ótimas de utilização, ambientes abertos e sem recurso a sistemas externos de amplificação de sinal. As bandas de frequência apresentadas podem sofrer algumas alterações mediante a região do globo.

2.2.3 Geolocalização

Os sistemas de geolocalização permitem fazer a identificação ou estimativa da localização geográfica real de um objeto através de coordenadas.

Atualmente existem diversos sistemas de geolocalização, contudo nesta secção apenas será abordado o sistema de navegação global por satélite (GNSS) (Figura 2.2.14).



Figura 2.2.14 – Módulo localização sistema GNSS (Adaptado [30])

O sistema GNSS foi inicialmente desenvolvido para uso militar, atualmente é um sistema aberto para uso civil, sendo o método mais popular de geolocalização *outdoor*. É utilizado nos mais diversos contextos, sendo possível a qualquer indivíduo saber a sua localização em qualquer parte do globo terrestre, bastando para isso estar equipado com um módulo de geolocalização.

Este método de geolocalização permite, através da comunicação rádio com constelações de satélites artificiais que orbitam em torno do planeta Terra, determinar com elevada precisão a localização. O processo anteriormente descrito é denominado de trilateração e permite obter a localização através da medição de distâncias a pontos/satélites de referência. Este sistema é altamente estável com a variação das condições atmosféricas.

Existem vários sistemas GNSS, sendo o sistema GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelos Estados Unidos da América, o mais utilizado. Outros sistemas existentes são o sistema europeu *Galileu*, o sistema russo *GLONASS* e o sistema chinês *BeiDou*.

Através da atualização periódica da localização, há atualmente dispositivos que fornecem outras informações, tais como a velocidade de deslocação sentido do movimento e altitude.

Capítulo III

Descrição do Problema e Arquitetura do Sistema

Sumário

Neste capítulo será descrito o problema que esta dissertação pretende solucionar, bem como os atributos e requisitos que a solução deverá compreender. No presente capítulo será ainda detalhada a solução proposta: funcionalidades, características gerais, modos de funcionamento e formato da mensagem transmitida.

3.1 Descrição do Problema

Como referido anteriormente, o ser humano necessita de água doce para atividades pecuárias, agrícolas, lúdicas e para o abastecimento das populações. Posto isto, e considerando o aumento dos padrões de qualidade de vida, assim com também os diversos problemas ambientais que afetam o nosso planeta, é cada vez mais imprescindível monitorizar a qualidade da água dos corpos de água doce, permitindo essa monitorização a identificação e sinalização daqueles que não estão em condições apropriadas de uso, evitando assim a utilização de águas impróprias.

Atualmente são comercializados sistemas fixos de monitorização da qualidade da água que recolhem, analisam e enviam os dados obtidos para plataformas *online*, permitindo desse modo o fácil acompanhamento por parte dos biólogos. É possível encontrar desde sistemas de baixo custo e fácil instalação, que recolhem e enviam análises simples, como pH e condutividade, até sistemas complexos que garantem alta fiabilidade nas análises e têm um elevado custo de aquisição e operação associado (Figura 3.1.1 a) e b)). Estes sistemas nem sempre são a solução indicada, quer seja pela necessidade de monitorização de diferentes localizações, ao invés de um ponto fixo, pela fiabilidade e complexidade das análises necessárias, custos associados e até pelas dificuldades em garantir a segurança dos equipamentos.



a)



b)

Figura 3.1.1 – a) Sistema básico de pequenas dimensões de monitorização de qualidade da água; b) Boia de grandes dimensões para monitorização de qualidade da água (Adaptado de [31] e [32])

A monitorização tradicional e mais comum é efetuada através da recolha e análise de amostras do corpo de água que se pretende controlar. Por norma as amostras são recolhidas e posteriormente analisadas em laboratório, podendo também a análise ser efetuada no local de recolha com recurso a instrumentos portáteis de campo, não sendo, no entanto, garantida a mesma fiabilidade e grau de complexidade nos resultados obtidos. As análises efetuadas em laboratório envolvem a recolha,

conservação e transporte das amostras até ao mesmo, sendo que as amostras se degradam com relativa facilidade e é comum os laboratórios serem distantes dos corpos de água a analisar. Para efetuar a recolha dentro do corpo de água é muitas vezes necessário recorrer à utilização de uma embarcação aquática tripulada, o que naturalmente levanta problemas de logística e tem custos monetários associados (Figura 3.1.2).



Figura 3.1.2 – Recolha de amostra de água através de embarcação aquática tripulada (Adaptado de [33])

A patente ACQUA_{VARD} visa resolver as condicionantes mencionadas nos parágrafos anteriores através da utilização de um dispositivo navegável autónomo não tripulado que contem uma unidade para auto-análise e quantificação de parâmetros de qualidade da água insitu. Este permite resolver os problemas de recolha, conservação, transporte e análise das amostras.

Existe a necessidade de desenvolvimento de uma solução dedicada para o ACQUA_{VARD}, ou seja, desenvolvimento de um sistema móvel não tripulável com locomoção própria em ambiente aquático, capaz de transportar um equipamento laboratorial de recolha e análise de água. Naturalmente este tipo de cenário requer uma solução cujas características incidam particularmente sob a robustez, as dimensões, manobrabilidade, fiabilidade, autonomia energética e custo monetário.

A solução desenvolvida deve ser capaz de transportar um equipamento de recolha e análise de água - laboratório - em barragens, lagos e rios com fracas correntes, ser controlada de forma remota por um operador e ter capacidade para comunicar diversas informações, entre as quais dados das análises realizadas pelo laboratório a transportar.

Dada a natureza do meio para o qual se pretende que o sistema seja utilizado, é necessário ter em atenção algumas características que necessitam de ser respeitadas durante a conceção do projeto do sistema, desde logo a distância de comunicação. Devido à grande dimensão de alguns corpos de

água onde o sistema pode vir a ser utilizado ou à possibilidade de uma corrente afastar o sistema do operador, é necessário e essencial garantir a comunicação a longas distâncias (Figura 3.1.3).



Figura 3.1.3 – Exemplo corpo de água doce - Barragem Aguieira, Tábua

A solução deve ser dotada de um sistema de geolocalização para que seja possível registrar os locais onde são efetuadas as análises e para que seja possível identificar determinadas localizações específicas a monitorizar dentro de um corpo de água, por exemplo locais onde são realizadas descargas de ETARs (Estação de Tratamento de Águas Residuais), indústrias ou pecuária.

O sistema não deve causar qualquer impacto no meio ambiente, devendo esse fator ser levando em conta aquando da escolha dos materiais para a construção do sistema. Uma vez que o sistema tem como finalidade navegar em águas que podem conter vida marinha e seres humanos, devem ser efetuadas escolhas que privilegiem a segurança destes.

A independência energética da embarcação é fundamental, sendo necessário garantir que esta se desloque até aos locais a analisar, retire os dados necessários e regresse em segurança para junto do operador. Por forma a minimizar o impacto ambiental deve ser evitado o uso de combustíveis fósseis e privilegiar o uso de baterias.

As dimensões físicas do sistema devem resultar de um compromisso entre o transporte seguro e eficaz do laboratório em ambiente aquático e a facilidade de arrumação, transporte e manobrabilidade de todo o sistema por parte do operador.

Por último, sendo este sistema idealizado para ambiente aquático, é importante que os componentes escolhidos sejam resistentes à humidade e estejam bem encapsulados. Dependendo da temperatura

das águas a navegar e da época do ano em que este for utilizado, os componentes do sistema vão estar sujeitos a uma grande variação de temperatura, logo os dispositivos escolhidos devem ter uma grande amplitude térmica de funcionamento.

3.1.1 Requisitos

De seguida encontram-se listados os requisitos a que a solução deve obedecer:

- Funcionamento em ambiente aquático calmo com locomoção própria;
- Controlo remoto;
- Comunicação sem fios de longa distância em campo aberto superior a 300 *m*;
- Mecanismo de geolocalização com erro inferior a 10 *m*;
- Velocidade máxima 2 *m/s*;
- Autonomia energética mínima de 3 horas;
- Transporte de cargas até 20 *kg* de massa e volume de 60 x 40 x 20 *cm*;
- Fácil manobrabilidade;
- Ampla gama térmica de funcionamento;
- Impacto ambiental mínimo;
- Sistema de propulsão que garanta segurança do sistema e de todos os seres vivos que se encontrem no corpo de água a analisar;
- Dimensões reduzidas que permitam transporte em automóvel ligeiro e manuseamento por parte de um único operador.

3.2 Solução Proposta

A solução proposta é composta por dois módulos diferentes, o barco e a base/comando de controlo (Figura 3.2.1). O módulo da base de controlo é o mais simples, no entanto é o módulo principal, pois é ele que comunica com o “mundo exterior” e transmite ao módulo secundário as ações que este deve tomar. O módulo secundário, localizado no barco, aguarda instruções do módulo principal e apenas comunica com este, sendo essa comunicação efetuada através de uma rede local sem fios.

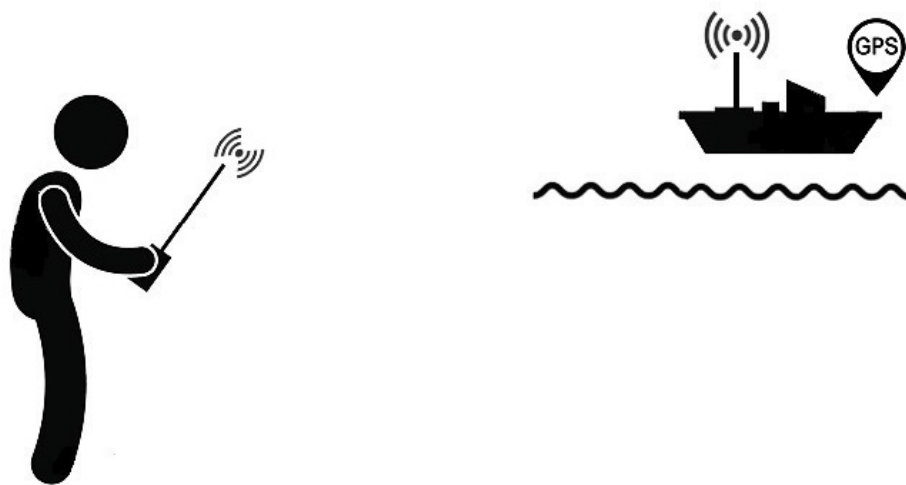


Figura 3.2.1 - Esboço da solução proposta

3.2.1 Arquitetura da Solução

A arquitetura da solução proposta encontra-se ilustrada na Figura 3.2.2. O módulo principal é constituído por um sistema computacional que efetua a monitorização e controlo de periféricos, um módulo de comunicação para comunicar com o módulo secundário e um módulo de comando através do qual recebe comandos de um operador.

O módulo secundário tem um maior número de funções e complexidade fruto dos diversos periféricos e atuadores necessários às suas funções. Este módulo contém um sistema computacional para efetuar a monitorização e controlo de periféricos, um módulo de comunicação para comunicar com o módulo principal, um módulo de controlo do motor, um módulo de controlo de direção do barco, um periférico de geolocalização, que permite obter a localização geográfica do barco e um módulo laboratorial, responsável por recolher e analisar amostras de água.

O sistema fica capacitado de receber comandos de um operador e transmitir, via comunicação sem fios de longo alcance, esses comandos ao módulo secundário, que tem a capacidade de os interpretar e consoante a informação recebida controlar a movimentação do barco e/ou recolher informações e enviá-las ao operador, via comunicação sem fios com o módulo principal.

Esta proposta resulta de um compromisso entre eficiência, fiabilidade e simplicidade de utilização por parte do operador, que apenas tem de interagir com um módulo de comando para efetuar o controlo do barco e requisitar informações, como por exemplo a localização.

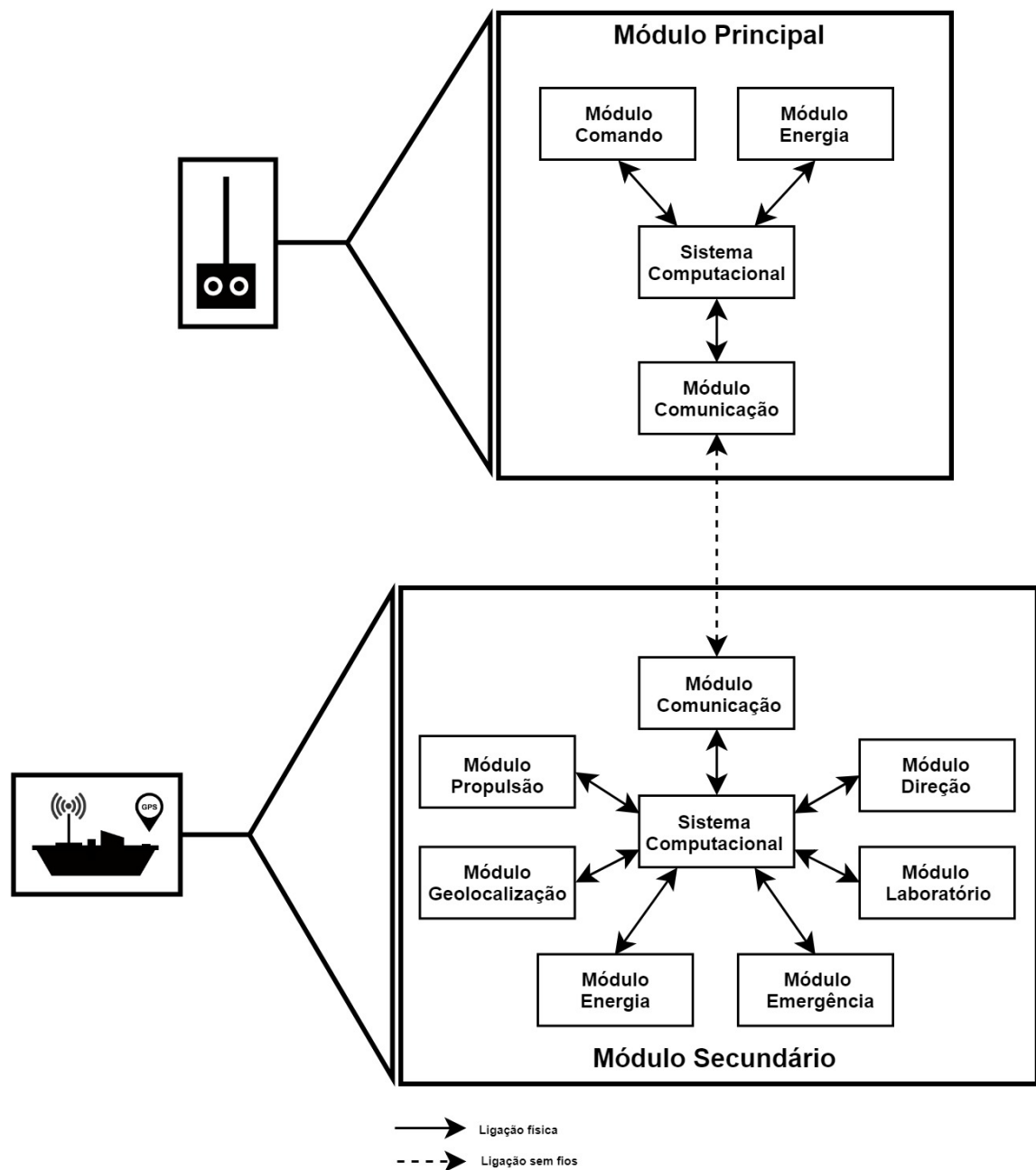


Figura 3.2.2 - Diagrama blocos da solução proposta

Funcionalidades

A solução proposta apresenta as funcionalidades seguintes:

- **Deslocação ambiente aquático:** Capacidade de locomoção própria em ambiente aquático e transporte de equipamento de recolha e análise de água;
- **Controlo remoto:** Controlo do barco efetuado à distância por um operador através de um comando/base controlo;
- **Comunicação sem fios:** Transmissão de todas as informações e controlo do barco efetuado por meio de uma rede local sem fios de longo alcance;
- **Geolocalização:** Aquisição e transmissão de coordenadas geográficas referentes à localização do barco;
- **Retorno em caso de falha comunicação:** Em caso de perda de comunicação entre os módulos o sistema secundário desloca-se de forma autónoma em direção a uma localização pré-estabelecida.

3.2.2 Módulos do Sistema

Nesta secção será feita uma breve descrição dos diferentes módulos que constituem o sistema e que se encontram representados na Figura 3.2.2.

Sistema computacional

O sistema computacional é responsável por realizar, através de um microcontrolador, o controlo, processamento e comunicação entre os diferentes módulos.

Comunicação

A comunicação sem fios entre o barco e o comando de controlo é realizada em RF através do uso de *transceivers* de comunicação RF com antenas externas.

Energia

A autonomia energética do sistema é garantida através de um sistema de baterias recarregáveis, sendo naturalmente cada um dos módulos, principal e secundário, munido de um sistema adequado as suas necessidades.

Comando

O controlo de velocidade, direção e sentido do barco, realizado pelo operador, pode ser efetuado por meio do teclado do computador da base de controlo, *touch* de um *smartphone* ou através de manípulos eletrónicos (*joystick*) de um comando físico. O comando/base de controlo tem ainda *switchs* através dos quais o operador pode requisitar informações e ativar outras opções.

Propulsão

O módulo de propulsão é responsável pela movimentação do barco, este é constituído por um propulsor, um motor e um circuito eletrónico de controlo do motor.

Direção

O controlo da direção e sentido do barco é efetuado por meio de um sistema físico comandado por dispositivos eletromecânicos de posição ajustável.

Geolocalização

As coordenadas geográficas são adquiridas através de um módulo GNSS que obtém dados do sistema GPS. Depois de ativo, o módulo envia de forma continua as informações de geolocalização para o sistema computacional, cabendo a esse sistema efetuar a receção, tratamento e posterior envio da informação para o módulo principal.

Emergência

O módulo de emergência tem como objetivo sinalizar falhas comprometedoras do bom funcionamento do sistema através de sinais sonoros e luminosos, permitindo desse modo facilitar a localização da embarcação e sinalizar a mesma de forma a prevenir acidentes e ser possível efetuar a recuperação mais facilmente.

Laboratório

O módulo laboratório é responsável pela recolha e análise de amostras de água.

3.2.3 Características

- Funcionamento em ambiente aquático exterior na gama de temperaturas entre -10 e 50 °C;
- Autonomia energética igual ou superior a 3 horas de utilização;
- Mecanismo de geolocalização com exatidão inferior a 10 m;

- Alcance comunicação em campo aberto igual ou superior a 500 *m*;
- Sistema de propulsão que garante locomoção própria e a segurança de todos os seres vivos que se encontrem no corpo de água a navegar, bem como a integridade física do próprio barco;
- Impacto ambiental mínimo.

3.3 Funcionamento

3.3.1 Comunicação

A comunicação entre os dois módulos do sistema, principal e secundário, irá ser efetuada num registo *master/slave*, em que o módulo principal é o *master* e o módulo secundário é o *slave*.

O módulo principal irá enviar mensagens de forma periódica ao módulo secundário, o qual irá responder sempre de volta, dependendo o conteúdo da mensagem do(s) pedido(s) efetuado(s) pelo operador através do módulo principal.

Em caso de perda de comunicação entre o comando e o barco, este último deve navegar no sentido do operador até que a comunicação entre ambos seja reestabelecida. Esta navegação autónoma do barco deverá ocorrer através do uso do sistema de geolocalização, sendo a aproximação realizada com base entre a localização do barco no momento da perda de comunicação e as coordenadas geográficas do operador no momento da introdução do sistema no corpo de água. No decorrer do período em que o barco navega de forma autónoma a navegação ocorre a velocidades bastante reduzidas de modo a prevenir qualquer tipo de acidente e reduzir ao máximo as consequências caso este ocorra. A Figura 3.3.1 ilustra um exemplo do processo anteriormente descrito.



Figura 3.3.1 – Ilustração de exemplo de quebra de comunicação entre módulos e processo de restabelecimento da mesma.

3.3.2 Monitorização Energética

A monitorização energética de qualquer sistema é importante, ganhando especial relevo neste caso dada a natureza do meio no qual o sistema vai ser utilizado.

De forma a prevenir uma falha de energia durante o uso do sistema e evitar que o barco fique à deriva num corpo de água, é realizada a monitorização do nível da bateria do módulo secundário em tempo real e estabelecido um limite a partir do qual é lançado um alerta ao operador e são limitadas as funções da embarcação às essenciais para o regresso em segurança para junto da margem.

O sistema será ainda dotado de uma segunda bateria que será ativada no caso de ocorrer uma falha na bateria principal e que terá como principal objetivo o fornecimento de energia para efetuar a deslocação da embarcação para um local da margem onde possa ser efetuada a sua recolha pelo operador. A segunda bateria, visto ter como objetivo funcionar apenas em caso de emergência, terá uma capacidade energética diminuta quando comparada com a bateria principal.

3.3.3 Formato Mensagens

O formato genérico das mensagens transmitidas e recebidas pelo módulo principal e secundário será igual, no entanto, este não terá uma estrutura com todos os campos fixos, uma vez que é necessário garantir flexibilidade para transmitir diversos tipos de informação (Figura 3.3.2 e Figura 3.3.3).

Formato mensagem módulo principal

Tipo de Mensagem	Código de Requisição	Mensagem
------------------	----------------------	----------

Figura 3.3.2 – Formato genérico de mensagem enviada pelo módulo principal

Formato mensagem módulo secundário

Tipo de Mensagem	Código de Erro	Mensagem
------------------	----------------	----------

Figura 3.3.3 – Formato genérico de mensagem enviada pelo módulo secundário

Como referido anteriormente, é necessário que o formato de mensagens seja flexível de modo a transmitir diferentes tipos de mensagem e ser possível integrar novas mensagens no futuro. Os

campos **Tipo de Mensagem** e **Código de erro/requisição** são fixos, o campo **Mensagem** é adaptável para cada tipo de mensagem.

Tipo de Mensagem, Código de Erro e Código de Requisição

No campo **Tipo de Mensagem** é transmitido um valor que permite ao módulo principal e secundário identificar o tipo de mensagem recebida. Na Tabela 3.3.1 encontra-se discriminada a relação entre o código do tipo de mensagem e o tipo de mensagem.

As mensagens de locomoção são enviadas pelo módulo principal, as mensagens de geolocalização e análise de água são enviadas pelo módulo secundário.

Tipo de Mensagem	Mensagem
0	Geolocalização
1	Locomoção
2	Análise de água
(...)	-

Tabela 3.3.1 – Tipos de erros dependendo do código de erro apresentado

O campo **Código de Erro** do formato de mensagens do módulo secundário é destinado à transmissão de erros que possam suceder. Caso a realização de uma determinada tarefa no módulo secundário falhe ou seja necessário enviar um alerta, é enviado um valor que corresponde ao tipo de erro que ocorreu. A Tabela 3.3.1 detalha a relação entre o código e o tipo de erro.

Código de Erro	Tipo de Erro
0	Não sucedeu nenhum erro
1	Erro na aquisição de geolocalização
2	Alerta pouca bateria
3	Falha bateria principal
(...)	-

Tabela 3.3.2 – Tipos de erros dependendo do código de erro apresentado

O campo **Código de Requisição** do formato de mensagens do módulo principal é reservado ao pedido de dados e ativação de ações por parte do modulo secundário, tais como a análise da água num determinado local e momento. É transmitido neste campo um valor diferente de 0 caso seja requisitada alguma informação ou realizado um pedido de ação. A Tabela 3.3.2 apresenta a correspondência entre a informação solicitada e o código apresentado.

Código de Requisição	Informação/Ação solicitada
0	Nenhuma informação/ação solicitada
1	Pedido de geolocalização
2	Pedido análise água
(...)	-

Tabela 3.3.3 – Informação solicitada dependendo do código de informação apresentado

Exemplo Mensagem Locomoção e Geolocalização

As mensagens de locomoção são um tipo de mensagens enviadas pelo módulo principal. Estas mensagens incluem no campo **Mensagem** a velocidade, direção e sentido em que é pretendido que o barco se mova (Figura 3.3.4).

Tipo de Mensagem	Código de Requisição	Velocidade	Direção	Sentido
------------------	----------------------	------------	---------	---------

Figura 3.3.4 – Informação transmitida na mensagem periódica enviada pelo módulo principal

As mensagens de geolocalização são enviadas pelo módulo secundário e incluem no incluem no campo **Mensagem** as coordenadas de geolocalização (Figura 3.3.5).

Tipo de Mensagem	Código de Erro	Coordenadas de geolocalização
------------------	----------------	-------------------------------

Figura 3.3.5 – Informação transmitida na mensagem de resposta enviada pelo módulo secundário

3.3.4 Estados de Funcionamento

O sistema possui três estados de funcionamento, o estado **Normal**, **Energia** e **AutoNavegação**. O estado **Normal** é o estado utilizado no normal funcionamento do sistema, o estado **Energia** e o estado **AutoNavegação** são acionados automaticamente quando é atingido o limite mínimo de bateria ou quando ocorre uma quebra de comunicação, respetivamente.

Estado Normal

O estado **Normal** é ativado sempre que se inicia o sistema, permanecendo ativo até que o sistema seja desligado ou um dos estados seguintes seja ativado. Neste estado todas as funcionalidades do sistema estão ativas. O fluxograma da Figura 3.3.4 ilustra o funcionamento deste estado.

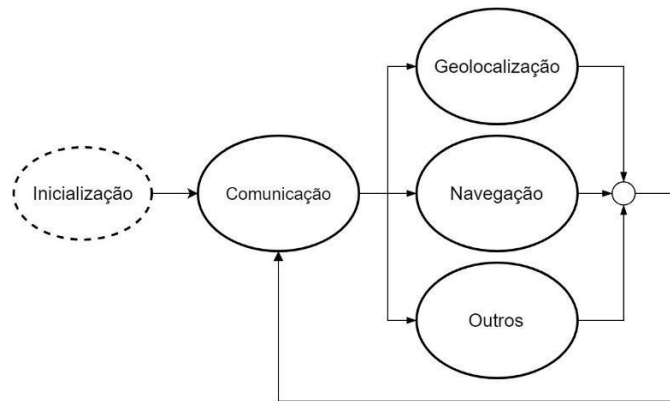


Figura 3.3.6 – Fluxograma com atividades efetuadas no estado Normal

Estado Energia

O estado **Energia** é ativado quando a bateria atinge o valor de carga mínimo preestabelecido ou quando ocorre uma falha na bateria principal. Neste estado só a funcionalidade de navegação fica disponível. O sistema abandona este estado quando o nível da bateria principal ultrapassar o valor de carga mínimo ou/e for reativada, o sistema for desligado ou o estado **AutoNavegação** for ativado. Na Figura 3.3.4 encontra-se ilustrado o funcionamento deste estado.



Figura 3.3.7 – Fluxograma com atividades efetuadas no estado Energia

Estado AutoNavegação

Este estado é despoletado quando há uma quebra de comunicação. Neste estado o sistema vai progressivamente aproximando-se da posição inicial do operador e tentando reestabelecer a comunicação (Figura 3.3.6). O estado é abandonado quando a comunicação for reestabelecida ou o sistema encerrado.

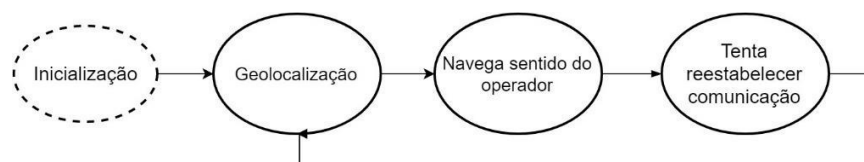


Figura 3.3.8 – Fluxograma com atividades efetuadas no estado AutoNavegação

Capítulo IV

Hardware e Firmware

Sumário

No presente capítulo serão apresentados os blocos de hardware e firmware que formam a solução. Será ainda analisado o consumo energético estimado e o custo da solução.

4.1 Hardware

Nesta secção será descrito o *hardware* selecionado para o desenvolvimento do sistema, módulo principal e secundário, assim com as características que levaram à sua escolha. O *hardware* foi selecionado e dimensionado de forma a cumprir os requisitos especificados no ponto 3.1.1 do Capítulo 3.

4.1.1 Blocos Hardware do Sistema

Os diagramas de blocos seguintes são representativos das ligações entre os diversos blocos de *hardware*. A Figura 4.1.1 ilustra as ligações do módulo secundário e a Figura 4.1.2 as ligações do módulo principal.

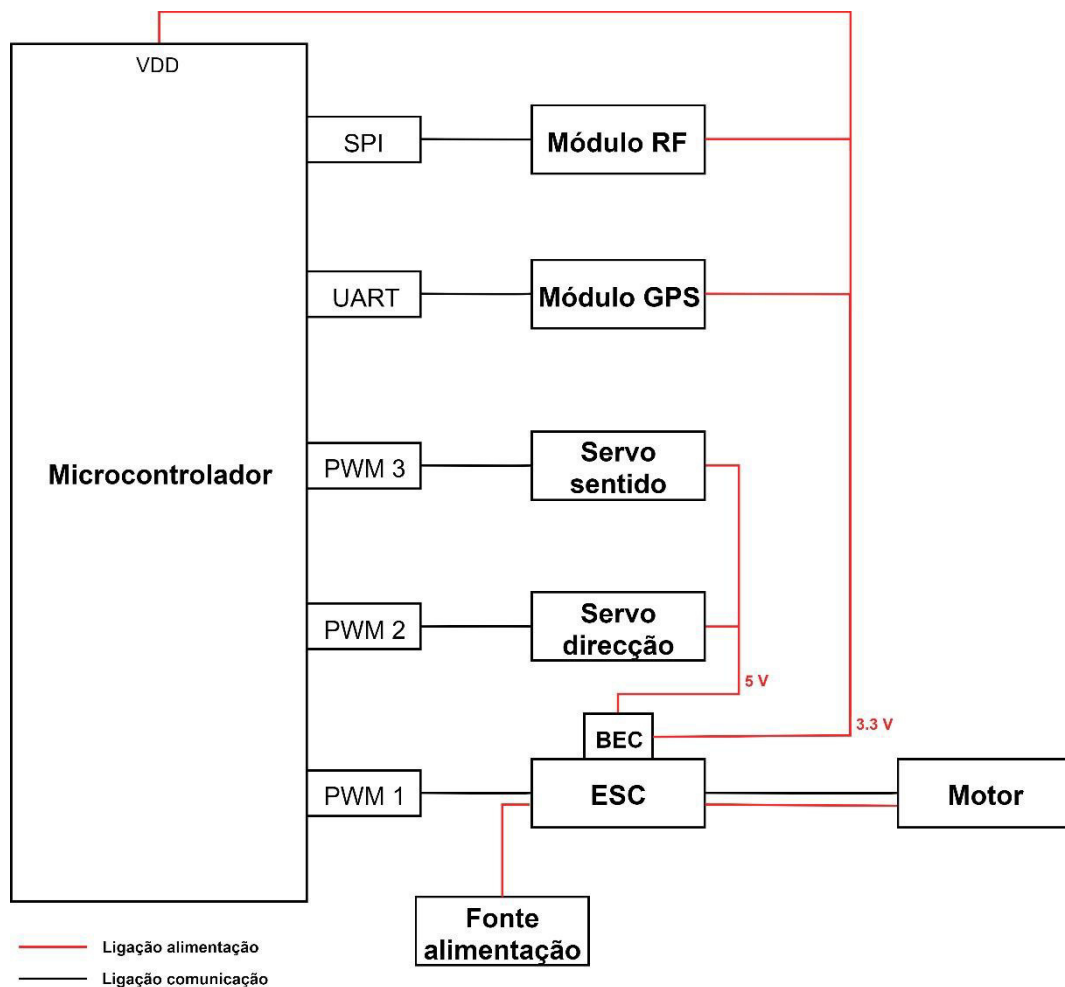


Figura 4.1.1 – Diagrama de blocos hardware módulo secundário

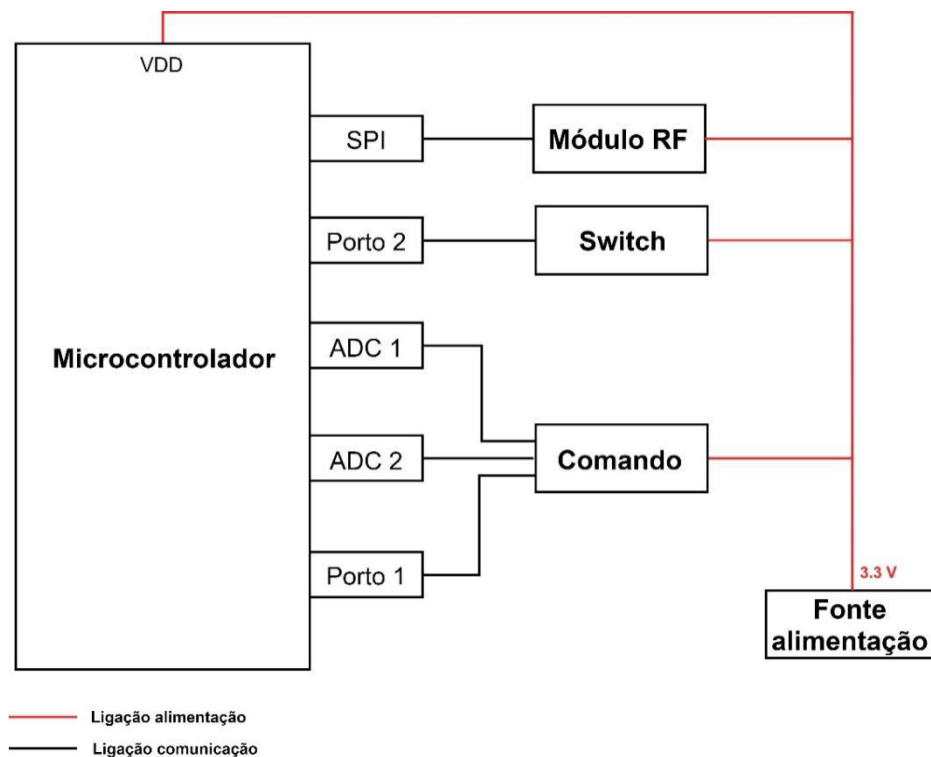


Figura 4.1.2 – Diagrama de blocos hardware módulo principal

4.1.2 Sistema Computacional

O sistema computacional selecionado para realizar tarefas de processamento, aquisição de sinal e comunicação, foi a placa de desenvolvimento DETPIC32, desenvolvida no Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática (DETI) da Universidade de Aveiro. Esta placa é baseada no microcontrolador (μ C) PIC32MX795F512H, com arquitetura 32 bits, do fabricante *Microchip*. (Figura 4.1.3). A escolha deste μ C baseou-se no facto de este cumprir todos os requisitos necessários ao projeto (tipos de comunicação, frequência de funcionamento, periféricos) e com e à sua disponibilidade imediata.

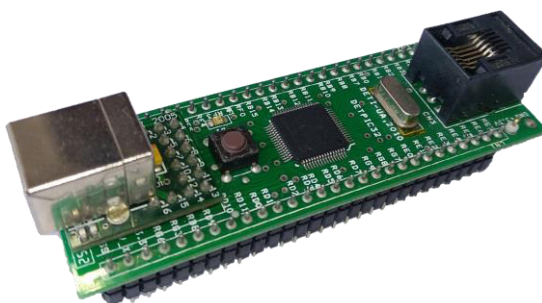


Figura 4.1.3 – Placa de desenvolvimento - DETPIC32

Principais características do μC [34] [35]:

- 6 UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*);
- 5 SPI (*Serial Peripheral Interface*);
- 5 *timers*, 2 com suporte PWM;
- ADC (*Analog to Digital Converter*) de 10 bits com 16 canais;
- Memória para programação: 512 *KBytes*;
- Frequência do relógio: até 80 *MHz*;
- Gama de alimentação: [3.3 – 5] *V*;
- Gama temperatura funcionamento: [-40 – 85] $^{\circ}\text{C}$.

4.1.3 Módulo RF

O módulo de comunicação RF escolhido foi o *transceiver* nRF24L01+, do fabricante *NORDIC* (Figura 4.1.4).

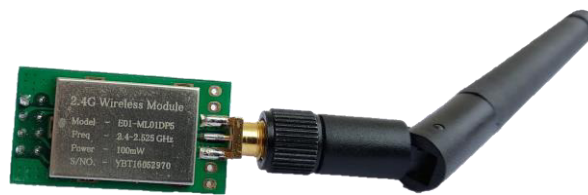


Figura 4.1.4 – Transceiver - nRF24L01+

Este módulo foi escolhido essencialmente pelas suas características de comunicação de longo alcance, velocidades de transmissão e pelo facto de ter protocolo de comunicação próprio e operar na banda de frequências ISM. As características consideradas mais relevantes são [36] [37]:

- Dimensões: 33 x 18 x 4 *mm*;
- Interface comunicação entre módulo e μC : SPI;
- Banda frequência operação: [2.4 – 2.525] *GHz*;
- Taxas de transmissão suportadas: 250 *kpbs*, 1 *Mbps* e 2 *Mbps*;
- Máxima potência transmissão: 20 *dBm*;
- Consumo energético (20 *dBm*, 250 *kpbs*): modo transmissão - 120 *mA*, modo receção - 26 *mA*, modo *sleep* - 1 *uA*;
- Alcance de transmissão máximo (antena 5 *dBi*, 250 *kpbs*): 2500 *m*;
- Gama de alimentação: [2 – 3.6] *V*;
- Gama temperatura funcionamento: [-40 – 85] $^{\circ}\text{C}$;

- Gama humidade funcionamento: [10 – 90] %;
- Protocolo de comunicação: ShockBurst™;
- Tipo antena: conector SMA, 2 dBi 2.4 GHz.

4.1.4 Módulo Geolocalização

O módulo de geolocalização selecionado foi o NEO-6M, do fabricante *u-blox* (Figura 4.1.5). Este módulo utiliza o sistema GPS da tecnologia de localização GNSS. As principais características que motivaram a escolha deste módulo foram o curto tempo de aquisição de sinal e a sensibilidade.



Figura 4.1.5 – Módulo GPS - *u-blox* NEO-6M

Algumas das principais características [38] [39]:

- Dimensões: módulo - 35 x 25 x 4 mm, antena - 25 x 25 x 8 mm;
- Interface comunicação entre módulo e μ C: UART;
- Protocolos de mensagens: NMEA (*National Marine Electronics Association*) e UBX;
- Tempo aquisição posição: *Cold Start* – 27 s, *Hot Start* – 1 s;
- Consumo energético (típico): 39 mA;
- Gama de alimentação: [2.7 – 3.6] V;
- Gama temperatura funcionamento: [-40 – 85] °C;
- Exatidão: 2.5 m;
- Tipo antena: conector I-PEX, 3 dBi 1.575 GHz.

4.1.5 Propulsor

O propulsor selecionado foi o KMB JET28, da empresa *KEHRER MODELLBAU* (Figura 4.1.6). Este propulsor é do tipo *Water Jet*. A escolha recaiu sobre um propulsor do tipo *Water Jet* devido a questões de segurança, de humanos e/ou vida marinha e do próprio sistema. Este propulsor foi

ainda escolhido devido à sua durabilidade e capacidade de mudança de direção e inversão de sentido. O acoplamento ao motor é feito através de uma transmissão.

Algumas características do propulsor [40]:

- Dimensões: 200 x 37 x 50 mm;
- Rotações (máximo): 20000 rpm;
- Massa: 125 g.



Figura 4.1.6 – Propulsor - KMB JET28

4.1.6 Motor

O motor selecionado foi o BL MOTOR 3670 (Figura 4.1.7). Este motor é do tipo BLDC *inrunner*. A escolha deste motor deveu-se à elevada eficiência energética, elevado torque, longa vida útil, custo, pouca ou nenhuma manutenção necessária ao longo do tempo e ao facto de ser direccionado para aplicações aquáticas.



Figura 4.1.7 – Motor BLDC - 3670 4POLES 2150kv

Características mais relevantes motor [41]:

- Dimensões: 36 x 70 mm;
- Consumo energético (máximo): 70 A;

- Gama de alimentação: $< 23 \text{ V}$;
- Potência: 1600 W ;
- Eficiência energética: 90% ;
- Número de polos: 4;
- Massa: 275 g ;
- KV (RPM/V): 2150 KV .

4.1.7 ESC – Controlador Motor

O ESC escolhido para efetuar o controlo do motor foi o HobbyKing 120A ESC 4A UBEC, da companhia *HobbyKing* (Figura 4.1.8). A escolha recaiu neste controlador devido a ser direcionado para aplicações aquáticas, conseguir fornecer a corrente necessária ao bom funcionamento do motor anteriormente descrito e ao facto de este ter um circuito eliminador de bateria (BEC). O BEC não é mais que um regulador de tensão que converte a tensão da bateria principal numa tensão mais baixa, para desse modo alimentar outros componentes eletrónicos (ex: servo) sem necessidade de ter uma outra bateria ou circuitos reguladores de tensão. O controlo do ESC ocorre através da variação do *duty-cycle* na gama $[1 - 2] \text{ ms}$, com o PWM de período igual a 3.3 ms (Figura 4.1.9).

Principais características do controlador [42]:

- Dimensões: $109 \times 45 \times 22 \text{ mm}$;
- Corrente pico: 150 A ;
- Corrente constante: 120 A ;
- Interface comunicação entre módulo e μC : PWM;
- BEC: $5 \text{ V} / 4 \text{ A}$;
- Gama de alimentação: $[7.4 - 22.2] \text{ V}$;
- Arrefecimento: *watercooled*;
- Modos funcionamento: frente com travão, frente e reverso com travão;
- Massa: 170 g .



Figura 4.1.8 – ESC - HobbyKing 120A ESC 4A UBEC

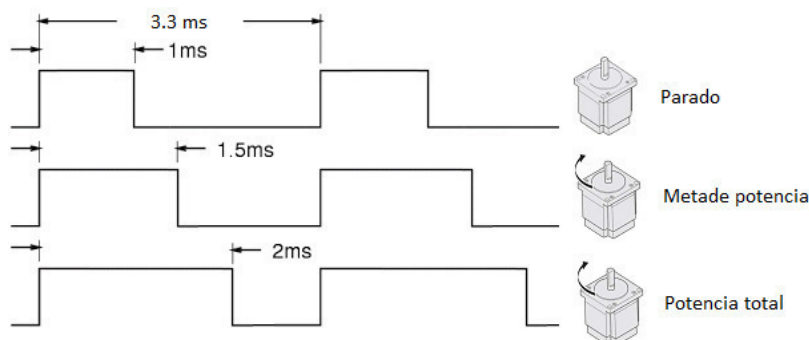


Figura 4.1.9 – Diagrama controle ESC com variação duty-cycle

4.1.8 Servo

Para efetuar o controle da direção e inversão de sentido do propulsor, e consequentemente do barco, foram escolhidos dois servos TowerProMG996R (Figura 4.1.10 a)). Por forma a serem mais robustos, os servos escolhidos possuem engrenagens metálicas. O controle do servo é realizado através da variação do *duty-cycle* do PWM na gama [1 – 2] ms (Figura 4.1.10 b)).

Para efetuar o controle da direção será utilizada toda a amplitude de rotação do servo, sendo que 0° correspondem a manter a direção alinhada e os extremos 60° e - 60° correspondem à alteração máxima da direção para a esquerda e direita, respetivamente.

A alteração do sentido de movimento do barco utilizará apenas metade da amplitude de rotação do servo, correspondendo os 0° ao movimento em frente e os 60° ao movimento para trás. Ao contrário do servo da direção, neste caso não vai ser possível alterar o ângulo de funcionamento para qualquer valor na gama [0 – 60] °, ou seja, há duas posições fixas, 0° e 60°, entre as quais alterna dependendo do sentido desejado.

De seguida são apresentadas algumas características do servo [43]:

- Dimensões: 40 x 20 x 43 mm;
- Interface comunicação entre módulo e μC : PWM;
- Velocidade de operação: 0.16 s/ 60°;
- Amplitude rotação: 120° → 60° para cada sentido;
- Gama de alimentação: [4.8 – 7.2] V;
- Consumo energético: [500 – 900] mA;
- Frequência de funcionamento: 50 Hz
- Massa: 55 g;
- Torque: 10 Kg/cm.

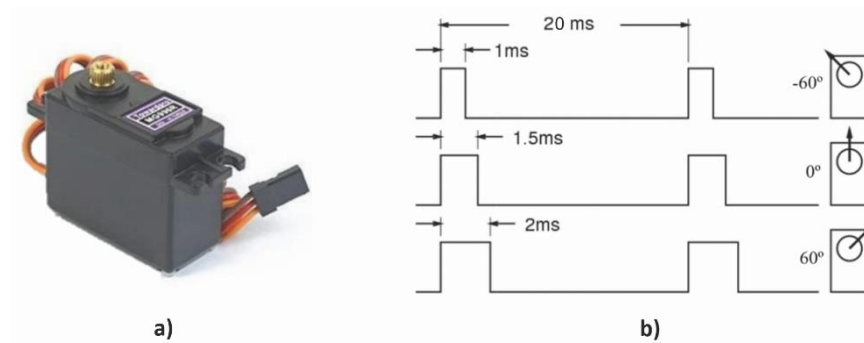


Figura 4.1.10 – a) TowerProMG996R; b) Diagrama controlo servo com variação duty-cycle (Adaptado de [44])

4.1.9 Comando

De forma a desenvolver o comando físico do módulo principal e tornar intuitivo o controlo da velocidade, direção e sentido do barco por parte do operador, foi selecionado um *joystick* (Figura 4.1.11). Este dispositivo tem um eixo físico que ao ser movido varia o valor de tensão entre 0 V e V_{CC} (tensão alimentação) em dois pinos de saída, V_x e V_y , cada um correspondente a um eixo. Este módulo permite ainda ativar a inversão de sentido de movimento, visto que tem um *switch* (SW) incorporado.

Características *joystick*:

- Gama de alimentação: 5.5 V;
- Eixos funcionamento: 2 (x e y).

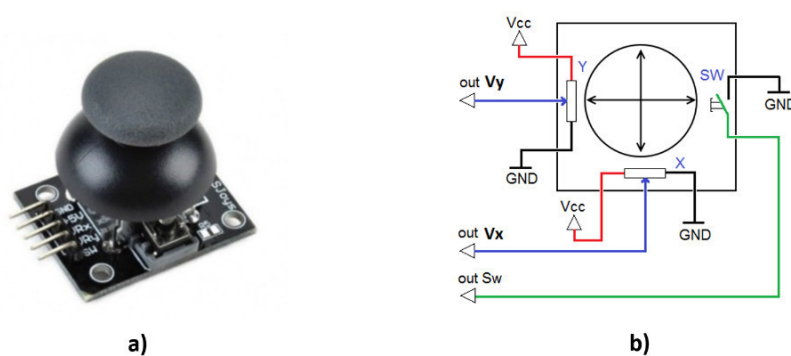


Figura 4.1.11 – a) Joystick; b) Esquemático ligações e composição joystick (Adaptado de [45])

4.1.10 Alimentação

De modo a satisfazer as necessidades energéticas do sistema foi selecionada a bateria Li-Po 3s 5000 mAh para o módulo secundário e a bateria 1s 2000 mAh para o comando físico do módulo

principal, ambas da companhia Turnigy (Figura 4.1.12 a) e b)). De entre os vários tipos de soluções existentes no mercado optou-se por baterias polímero de lítio (Li-Po) uma vez que estas, quando comparadas com outras baterias, apresentam um longo ciclo de vida, pouco risco para o meio ambiente e uma elevada densidade energética em relação a outros tipos de baterias, o que é importante uma vez que massa total do sistema terá relevância no desempenho energético, locomoção e transporte do mesmo [46].



Figura 4.1.12 – a) Bateria Li-Po - Turnigy 3s 5000 mAh; Bateria Li-Po - Turnigy 1s 2000 mAh

Características bateria módulo principal [47]:

- Dimensões: 49 x 34 x 10 mm;
- Massa: 33 g;
- Tensão: 3.7 V;
- Capacidade: 2000 mAh;
- Número células: 1;
- Descarga constante máxima: 1 C (1 x 2000 mAh).

Características bateria módulo secundário [48]:

- Dimensões: 146 x 50 x 25 mm;
- Massa: 412 g;
- Tensão: 11.1 V;
- Capacidade: 5000 mAh;
- Número células: 3;
- Descarga constante máxima: 25 C (25 x 5000 mAh);
- Descarga pico máxima: 30 C (30 x 5000 mAh).

De forma a garantir uma tensão de alimentação estável e dentro das gamas de funcionamento dos módulos de *hardware* apresentados nos pontos anteriores, recorreu-se a reguladores de tensão

linear e ao BEC presente no ESC. Para garantir a tensão necessária (3.3 V) ao bom funcionamento do *hardware* do módulo principal utilizou-se um regulador de tensão de 3.3 V.

Os valores de alimentação do módulo secundário, fruto das diferentes tensões necessárias, foram alcançados através do uso de um regulador de tensão de 3.3 V e do BEC, que garante uma saída de tensão estável de 5 V. A alimentação do ESC é fornecida diretamente da bateria.

Na Figura 4.1.13 a) e b) encontram-se os diagramas dos blocos de alimentação do módulo principal e secundário, respetivamente.

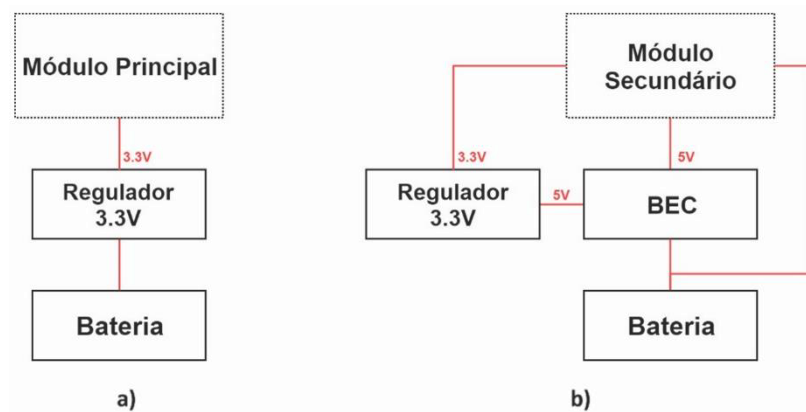


Figura 4.1.13 – a) Diagrama blocos alimentação módulo principal; b) Diagrama blocos alimentação módulo secundário

4.1.11 Protótipo

No decorrer da dissertação foram desenvolvidos dois protótipos. Numa primeira fase foi desenvolvido o protótipo da Figura 4.1.14, denominado **protótipo I**, que teve como objetivo estudar e testar os componentes em ambiente laboratorial.



Figura 4.1.14 – a) Protótipo I; b) Teste protótipo I em ambiente laboratorial

Numa segunda fase, após validação dos componentes e da arquitetura implementada em ambiente controlado, foi desenvolvido o protótipo da Figura 4.1.15, **protótipo II**. Este protótipo teve como finalidade a realização de testes de campo em corpos de água de forma a testar e validar os componentes selecionados e o *firmware* desenvolvido. O casco utilizado é bastante rudimentar, servindo apenas como base para testes do restante hardware, não sendo objetivo desta dissertação o seu desenvolvimento.



Figura 4.1.15 – Protótipo II

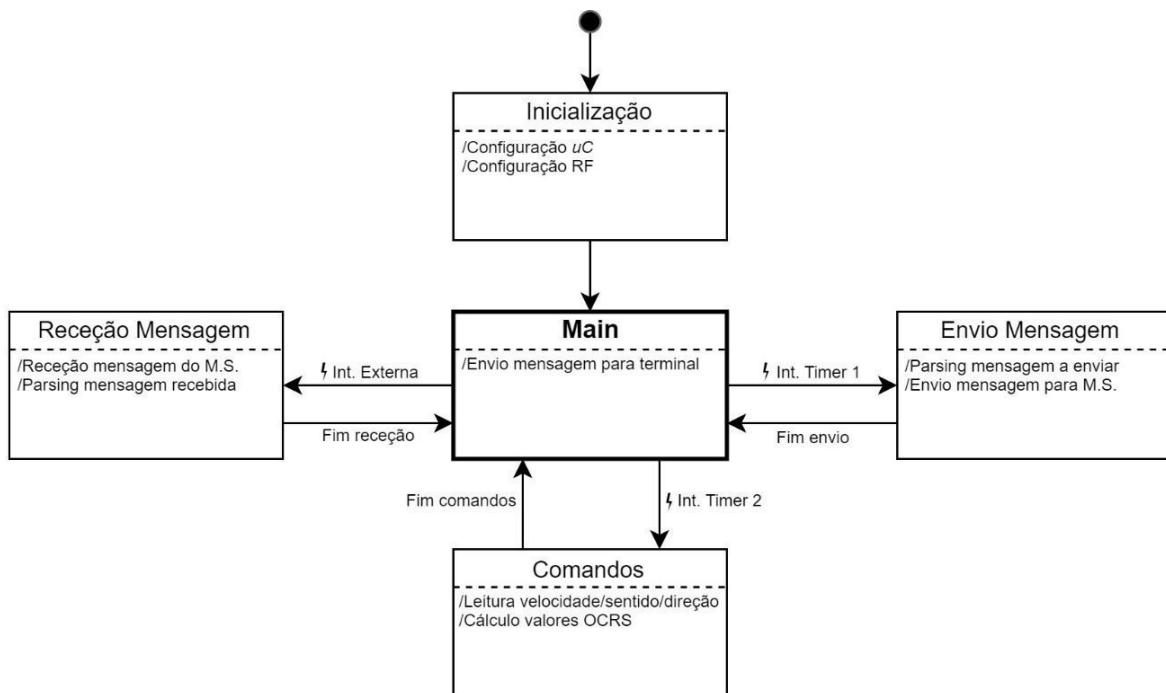
4.2 Firmware

A presente secção descreve o *firmware* desenvolvido para os diversos dispositivos do módulo principal e secundário do sistema.

4.2.1 Máquina de Estados

As máquinas de estado seguintes são representativas das ligações entre os diversos blocos de *firmware*.

Na Figura 4.2.1 encontra-se ilustrada a máquina de estados do módulo principal. Findo o procedimento denominado *Inicialização*, que ocorre após a ligação do módulo, o sistema entra num estado central, denominado de **Main**, a partir do qual se desenrolam todas as ações. As interrupções *Int. Timer 1*, *Int. Timer 2* e *Int. Externa* despoletam as ações *Envio Mensagem*, *Receção Mensagem* e *Comandos*, respetivamente. Após o término das rotinas de serviço à interrupção o algoritmo regressa ao estado **Main**.



⚡ Ação gerada por uma interrupção

Figura 4.2.1 – Diagrama de estados módulo principal

A Figura 4.2.2 ilustra a máquina de estados do módulo secundário. Existem três estados, **Normal**, **Energia** e **AutoNavegação**, correspondendo estes aos três estados descritos no ponto 3.3.4 do

capítulo 3. Após o procedimento de *Inicialização*, onde ocorrem configurações, o sistema entra no estado **Normal**, estado a partir do qual é possível realizar todas as ações. Caso o valor da bateria atinja o nível crítico ou ocorra uma quebra na comunicação, o sistema transita para o estado **Energia** ou **AutoNavegação**, respetivamente.

As interrupções *Int. Timer*, *Int. UART* e *Int. Externa* despoletam as ações *Bateria*, *Geolocalização* e *Comunicação*, respetivamente. Após o término das rotinas de serviço à interrupção o programa regressa ao estado em que se encontrava. O evento *Msg. completa* despoleta a ação *Parsing Geolocalização*. A ocorrência de um dos eventos *Nível bateria crítico*, *Nível bateria reestabelecido*, *Perda comunicação* e *Comunicação reestabelecida* resulta numa alteração de estado.

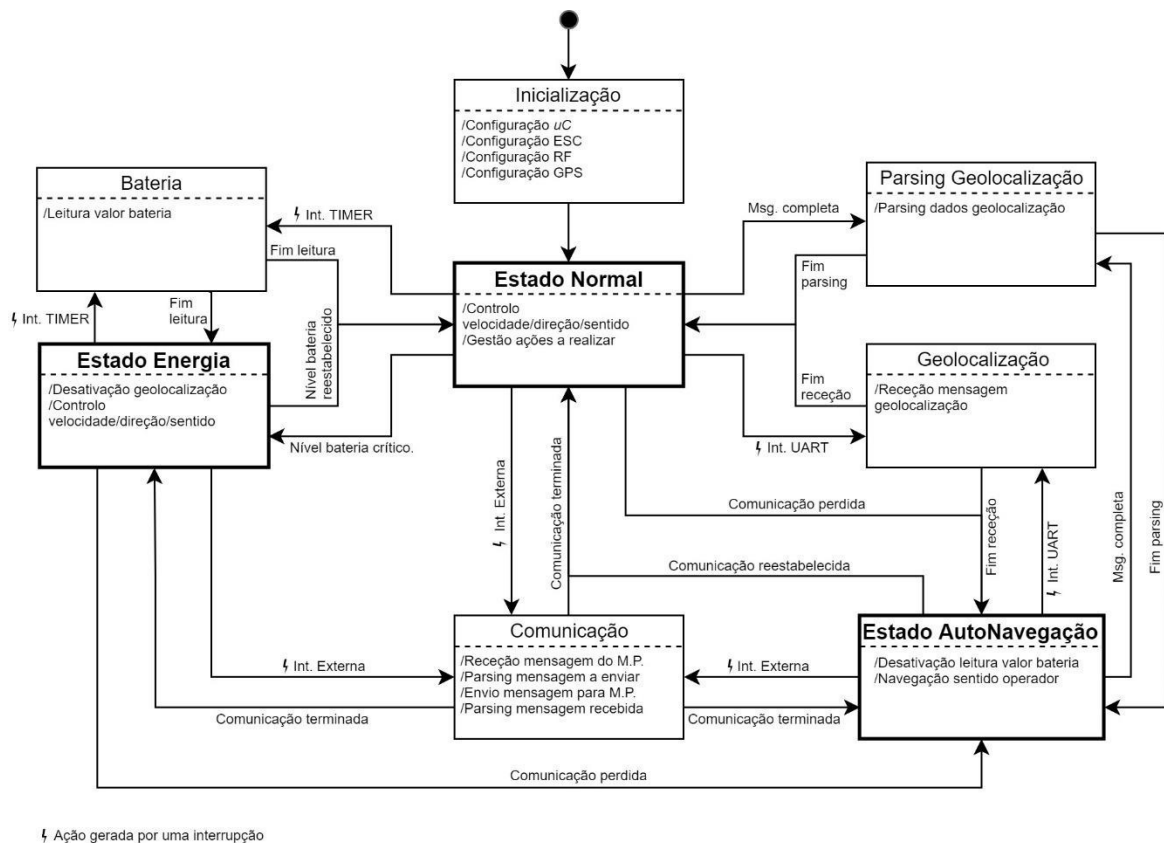


Figura 4.2.2 – Diagrama de estados módulo secundário

4.2.2 Inicialização μC e módulos de hardware

Quando o μC , tanto do módulo principal como do secundário, é iniciado, ocorrem uma série de configurações de pinos I/O, protocolos de comunicação e configuração de módulos de *hardware*.

No módulo principal é configurada a ADC, a SPI, os pinos I/O correspondentes, o *timer* 2 e o módulo RF.

No módulo secundário é configurado o *timer* 2 e 3, o PWM, a SPI, a UART, os pinos I/O correspondentes a esses protocolos de comunicação, e ainda os módulos de GPS, RF e ESC.

4.2.3 Estrutura de Dados

De modo a armazenar os dados de navegação, nível de bateria, erros, requisições, tipo de mensagem e coordenadas de geolocalização foi formulada uma estrutura de dados designada *BoatData*, acessível por todas as funções. A estrutura é igual nos dois módulos. Todos os dados são armazenados diretamente nas variáveis, à exceção dos dados das coordenadas de geolocalização que são armazenados numa estrutura própria que é explanada na secção 4.2.6.

A estrutura de dados *BoatData* encontra-se detalhada de seguida:

```
struct {  
    int    PWM Velocidade;  
    int    PWM Direção;  
    int    Sentido;  
    int    Tipo de Erro;  
    int    Tipo de Requisição;  
    int    Tipo de Mensagem;  
    int    Nível de Bateria;  
    Geo_Struct    GeoData;  
} BoatData;
```

4.2.4 Velocidade e Direção

O módulo secundário tem a função de controlar a velocidade, direção e sentido do barco. Para tal tem de controlar o motor, via ESC, e os servos que controlam fisicamente a direção e inversão de sentido. O controlo de todos os atuadores é realizado através de PWM.

Servo

Como referido na secção 4.1.8, os servos têm uma frequência de funcionamento de 50 *Hz* e o controlo da sua posição é efetuado através da variação do *duty-cycle* na gama [1 – 2] *ms*. Na Tabela 4.2.1 encontram-se os valores de funcionamento do OCRS, registo do μC que permite controlar o *duty-cycle* do PWM, correspondentes à gama de variação do *duty-cycle*. Encontram-se ainda na

tabela os valores referentes à frequência do PWM configurada, assim como a gama de valores do OCRS (G_{OCRS}), que resulta da diferença entre o $OCRS_{Max}$ e $OCRS_{Min}$, e o valor de *offset*.

ESC/Motor

O controlo do motor, tal como referido em 4.1.7, é realizado por PWM através do ESC, com uma frequência de 300 Hz. Quando o módulo secundário é iniciado, é necessário configurar no ESC os valores do *duty-cycle*, gerados pelo μC , que correspondem à máxima e mínima potência aplicadas ao motor [31]. Essa configuração é efetuada através da colocação do OCRS no valor máximo de *duty-cycle* (60% – 2 ms) durante 10 segundos, seguida da colocação do OCRS no valor mínimo de *duty-cycle* (30% – 1 ms) durante, no mínimo, 10 segundos (Figura 4.2.3).

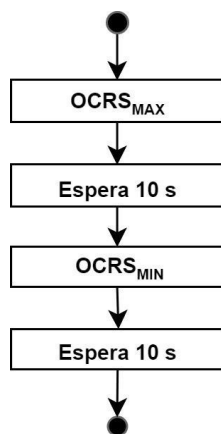


Figura 4.2.3 – Diagrama de blocos das configurações de inicialização do ESC

Após este período de configuração o ESC está pronto para receber comandos e interagir com o motor.

	Freq.PWM (Hz)	OCRS _{Min}	OCRS _{Central}	OCRS _{Max}	Offset	G _{OCRS}
ESC/Motor	300	15000	-	25000	15000	10000
Servo direção	50	1225	3113	5000	1225	3775
Servo sentido	50	3113	-	5000	3113	-

Tabela 4.2.1 – Frequência timers, valores de OCRS e Offset para servos e ESC/Motor

Os valores de $OCRS_{Min}$ e $OCRS_{Max}$ da Tabela 4.2.1 para o ESC/Motor, correspondem respetivamente à potência mínima e máxima aplicável ao motor, sendo que para o valor de potência mínima o motor permanece parado. Para o servo de direção os valores de $OCRS_{Min}$ e $OCRS_{Max}$ correspondem à alteração máxima da direção para a esquerda e direita, respetivamente. O valor $OCRS_{Central}$ corresponde a manter a direção centrada. Para o servo de sentido o valor de $OCRS_{Min}$ corresponde ao movimento em frente e $OCRS_{Max}$ ao movimento para trás.

Controlo de Velocidade/Direção/Sentido

Os valores do *duty-cycle* a aplicar ao ESC e ao servo de direção, são calculados no módulo principal, de acordo com *input* dado pelo operador (ver secção 4.2.5), e enviados para o módulo secundário. A inversão de sentido também é transmitida pelo operador ao módulo principal e enviada por este ao módulo secundário, no entanto, neste caso não existem cálculos, pois o servo só pode tomar uma de duas posições. Os valores do *duty-cycle* do ESC e servos são atualizados a cada 100 ms.

O diagrama de blocos da Figura 4.2.4 ilustra o funcionamento do algoritmo de controlo de velocidade, direção e sentido. Por forma a evitar que numa situação de perda de contacto entre o módulo principal e secundário o barco se movimente de forma desgovernada, foi criado um mecanismo de *timeout* para quando o sistema se encontra no estado **Normal** ou **Energia**. A variável *NumEntradas* é incrementada sempre que o algoritmo de controlo de velocidade, direção e sentido é executado, ou seja, a cada 100 ms. A variável é colocada a zero sempre que é recebida uma nova mensagem do módulo principal, a cada 100 ms. Se houver uma quebra de comunicação entre os módulos superior a 1 segundo, o motor é travado, a direção colocada na posição central e o estado de comunicação alterado para perdido.

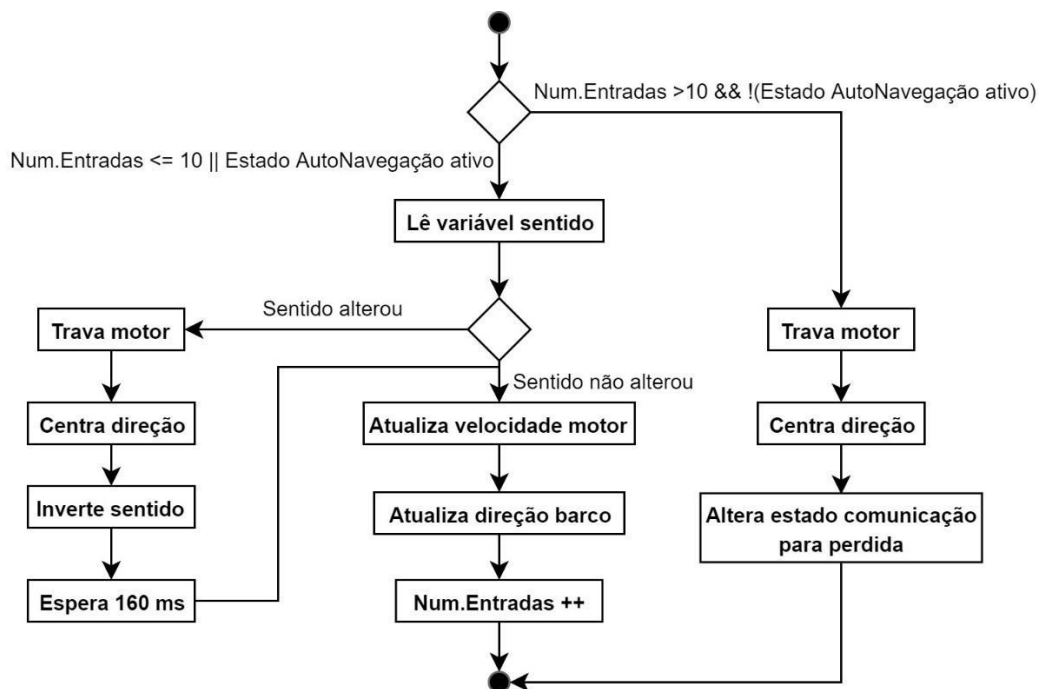


Figura 4.2.4 – Diagrama de blocos do algoritmo de controlo de direção, sentido e velocidade

De modo a salvaguardar a integridade física do sistema de propulsão, sempre que ocorra uma solicitação de mudança de sentido, o motor é travado e a direção centrada, somente após essas duas

ações o sistema físico que possibilita a inversão de sentido é ativado. A espera de 160 ms deve-se ao tempo que o sistema de inversão demora a efetuar a mudança, uma vez que o servo tem de efetuar uma mudança de 60°, e como referido em 4.1.8, a sua velocidade de operação é de 160 ms/60°.

4.2.5 Comando

O módulo principal é responsável por ler do *joystick* as orientações de movimentação que o operador pretende que o barco realize. Como explicado em 4.1.9, o *joystick* funciona com base na variação de um valor de tensão entre [0 – 3.3] V nos terminais de saída. Para ler esta variação de tensão será utilizada a ADC, esta tem 10 bits de resolução e suporta uma tensão máxima de 3.3 V na sua entrada.

Como a ADC é de 10 bits (N) e a gama de tensão de entrada (V_R) é 3.3 V, o LSB (*Least Significant Bit*) é dado por,

$$LSB = \frac{V_R}{2^{N-1}} \quad (V) \quad (4.1)$$

resultado aproximadamente 3.2 mV.

Após ser realizada a amostragem e feita a conversão pela ADC, o valor de tensão num dado eixo, x (V_X) ou y (V_Y), é obtido através da Equação 4.2, onde Val_{ADC_X} e Val_{ADC_Y} , são os valores lidos e armazenados pela ADC, correspondentes aos eixos x e y , respetivamente.

$$V_{x/y} = \frac{Val_{ADC_X/Y} * 3.3}{2^{N-1}} \quad (V) \quad (4.2)$$

Como referido em 4.2.3, os PWM foram configurados com uma frequência de 50 Hz para os servos e 300 Hz para o ESC/Motor. Considerando a gama de valores do OCRS, para o servo e ESC/Motor, indicados na Tabela 4.2.1, e considerando ainda o valor V_X , ou V_Y , obtido através da Equação 4.2, é possível calcular o valor do *duty-cycle* a aplicar ao servo e ESC/motor a cada instante.

$$Duty_{x/y} = \frac{V_{x/y} * G_{OCRS_X/Y}}{3.3} + Offset_{x/y} \quad (4.3)$$

Juntando a Equação 4.2 e 4.3, resulta,

$$Duty_{x/y} = \frac{Val_{ADC_X/Y} * G_{OCRS_X/Y}}{2^{N-1}} + Offset_{x/y} \quad (4.4)$$

Os valores de $Duty_x$ e $Duty_y$ calculados são colocados no campo *PWM Velocidade* e *PWM Direção* da estrutura *BoatData* para posteriormente serem enviados ao módulo secundário.

O *joystick* tem ainda um *switch* que determina o sentido do movimento do barco. Este *switch* está conectado a um porto do μC , o valor binário deste é lido e armazenado na variável da estrutura associada ao sentido de movimento, *Sentido*.

Na Figura 4.2.5 encontra-se ilustrado o diagrama de blocos do processo anteriormente descrito, sendo que este é espoletado por uma interrupção a cada 100 ms.

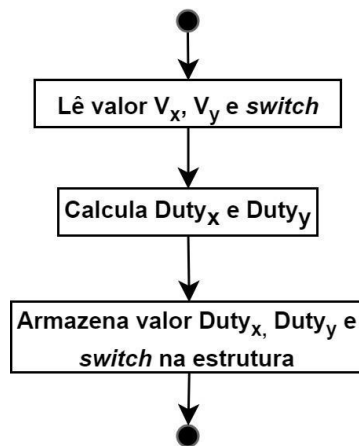


Figura 4.2.5 – Diagrama de blocos comando

4.2.6 Geolocalização

Configurações

A comunicação entre o módulo secundário e o módulo GPS é efetuada através de UART, com uma configuração de *baudrate* de 9600 *bps* e um período de envio de mensagens de 1 segundo. O módulo suporta dois protocolos de mensagens, UBX e NMEA sendo que o primeiro é utilizado preferencialmente para fazer a configuração do módulo e o segundo e para transmitir mensagens de dados.

Protocolo NMEA

O protocolo NMEA transmite mensagens em código ASCII. Estas são iniciadas com o símbolo '\$', usam o símbolo ',' para separar os diferentes campos e são finalizadas com o carácter '\r'. As mensagens têm uma dimensão máxima de 82 caracteres. Os tipos de mensagens mais relevantes, e os campos mais importantes de cada uma delas, podem ser encontradas na Tabela 4.2.2.

	Data	Tempo	Posição	Velocidade	Direção	Altitude	Nº de satélites	Azimuth	Validade
GSV	X	X	X	X	X	X	✓	✓	X
RMC	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
GSA	X	X	X	X	X	X	✓	X	✓
GGA	X	X	✓	X	X	✓	X	X	✓
GLL	X	✓	✓	X	X	X	X	X	✓
VTG	X	X	X	✓	X	X	X	X	✓
TXT	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ZDA	✓	✓	X	X	X	X	X	X	X

Tabela 4.2.2 – Tipo de mensagens do protocolo NMEA e campos mais relevantes de cada uma.

Os dados relevantes para o sistema são a posição (coordenadas) e a validade (campo que indica se posição está fixa). A mensagem RMC têm no seu conteúdo os dados anteriormente mencionados como relevantes para o sistema, como tal será a única mensagem a ter os seus campos armazenados e processados.

Na Figura 4.2.6 pode ser visualizada a estrutura e um exemplo de uma mensagem RMC do protocolo NMEA.

Estrutura mensagem:

```
$GPRMC, hhmmss, status, latitude, N, longitude, E, spd, cog, ddmmyy, mv, mvE, mode*cs<CR><LF>
```

Exemplo mensagem:

```
$GPRMC, 083559.00, A, 4717.11437, N, 00833.91522, E, 0.004, 77.52, 091202, , , A*57
```

Figura 4.2.6 – Estrutura e exemplo de mensagem RMC do protocolo NMEA (Adaptado de [20])

Algoritmo de Receção

O diagrama de blocos da Figura 4.2.7 ilustra o funcionamento do algoritmo de receção e armazenamento dos dados de geolocalização. De forma a garantir o armazenamento eficiente de informação foram criados dois *buffers* que são utilizados de forma alternada. Assim é possível evitar que uma nova mensagem seja escrita num *buffer* onde ainda existe uma mensagem a ser processada.

Como é possível verificar no diagrama, sempre que é recebida uma interrupção, o carácter (*C*) é lido, caso seja valido é escrito no buffer, caso não seja é descartado. A variável *Mensagem Inicializada* indica se há ou não uma mensagem em receção. Dependendo do seu estado e do conteúdo de *C* é decidido se é iniciada a gravação de uma nova mensagem, continuação ou finalização de uma mensagem já inicializada.

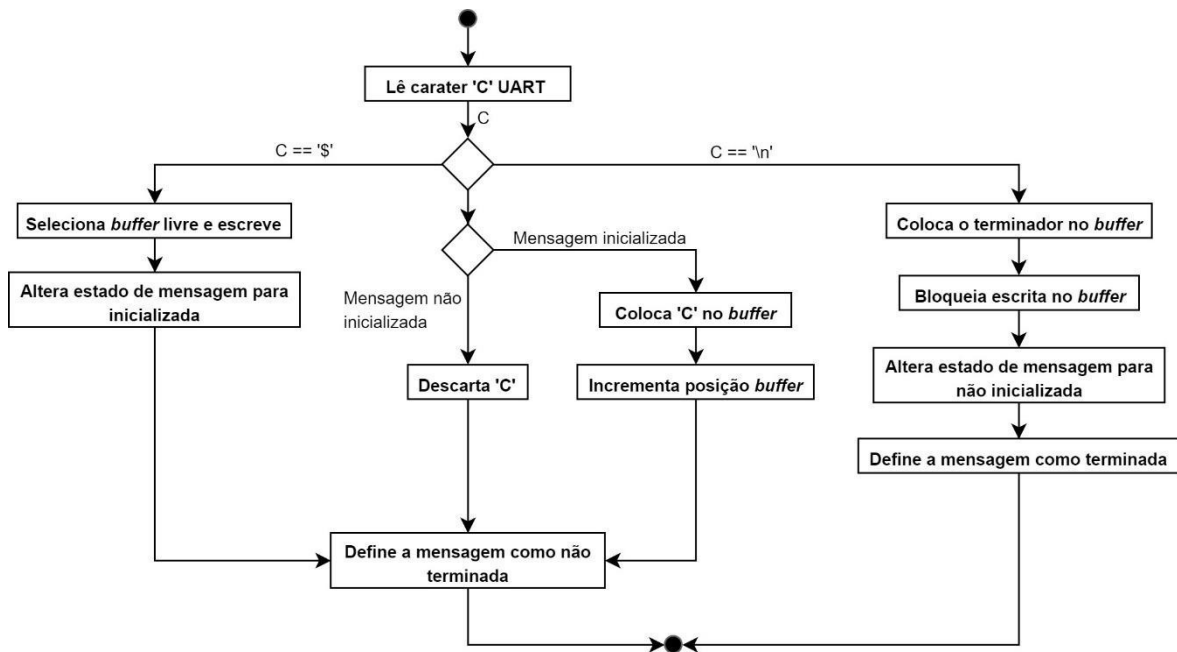


Figura 4.2.7 – Diagrama de blocos do algoritmo de recepção e armazenamento dos dados de geolocalização

Algoritmo de Parsing

O algoritmo de *parsing* é responsável por validar a mensagem recebida, isto é, verificar se esta é do tipo RMC. Caso seja, vai alocar os diferentes elementos desta numa estrutura concebida para armazenar os dados de geolocalização transmitidos pelo módulo GPS.

O diagrama de blocos da Figura 4.2.8 ilustra o funcionamento do algoritmo de *parsing*. O algoritmo é iniciado após a mensagem ser definida como terminada pelo algoritmo de recepção. Este começa por seleccionar o *buffer* que contém uma mensagem para leitura e efetuar a identificação dos diferentes campos da mensagem. De seguida armazena os ponteiros que apontam para o início de cada campo, num *array* de ponteiros. Posteriormente verifica, através da leitura dos campos que indicam o tipo de mensagem e a validade da posição, se a mensagem é válida e se a posição está adquirida. Caso o tipo de mensagem não seja válido ou a posição não esteja adquirida, a mensagem é definida como inválida ou o estado de posição como não bloqueado, respetivamente. No caso de ambas as condições se verificarem, os vários campos da mensagem são armazenados na estrutura de dados criada para o efeito e o estado da posição definido com bloqueado.

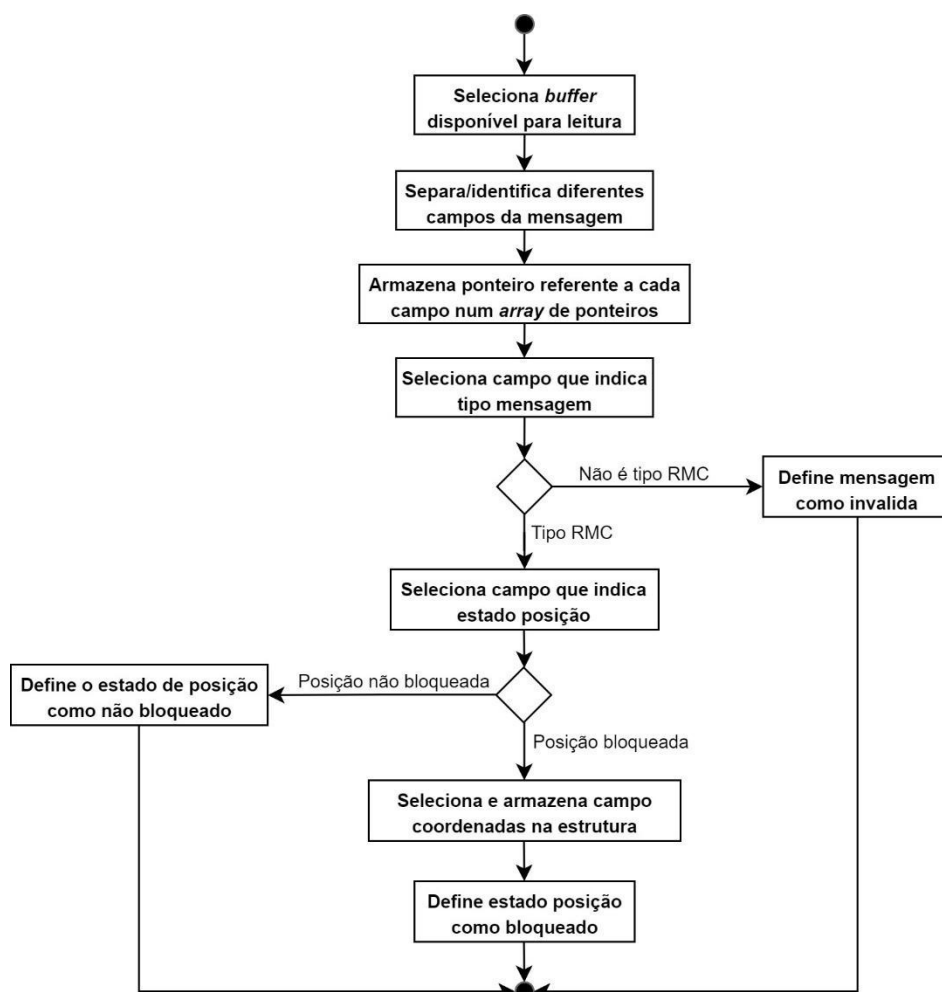


Figura 4.2.8 – Diagrama do algoritmo de parsing de mensagens geolocalização

As coordenadas transmitidas pelo módulo GPS encontram-se no formato graus, minutos e décimas de minutos (*degrees, minutes and decimal of minutes*), *dddmm.mmmm* e *ddmm.mmmm*. Este formato de coordenadas não é *standard*, sendo por isso, antes da transmissão para o módulo principal, efetuada a conversão para graus e décimas de grau, formato *standard* denominado por *decimal degrees*, *ddd.ddddd* e *dd.ddddd*. Na Tabela 4.2.3 encontra-se um exemplo de coordenadas geográficas representadas no formato *decimal degrees*.

	Formato	Exemplo
Longitude	ddd.ddddd	-122.61458
Latitude	dd.ddddd	32.30642

Tabela 4.2.3 – Exemplo de coordenadas geográficas representadas no formato *decimal degrees*

No formato *decimal degrees*, as unidades de grau das coordenadas de longitude estão compreendidas no intervalo $[-180 - 180]^\circ$ e as de latitude entre $[-80 - 80]^\circ$. O ponto cardeal

representa-se através do sinal das coordenadas. Quando positivo, representa o ponto cardinal Este na longitude e Norte na latitude, quando negativo representa o ponto cardinal Oeste na longitude e Sul na latitude.

Estrutura de Dados Geolocalização

A estrutura de dados criada para armazenar os dados de geolocalização transmitidos pelo módulo GPS é composta pelas seguintes variáveis:

- **Longitude Inteiro** – Corresponde à parte inteira do grau das coordenadas de longitude;
- **Longitude Decimal** – Corresponde à parte decimal do grau das coordenadas de longitude;
- **Latitude Inteiro** – Corresponde à parte inteira do grau das coordenadas de latitude;
- **Latitude Decimal** – Corresponde à parte decimal do grau das coordenadas de latitude;
- **Longitude Ponto Cardinal** – Corresponde ao ponto cardinal das coordenadas de longitude;
- **Latitude Ponto Cardinal** – Corresponde ao ponto cardinal das coordenadas de latitude.

4.2.7 Comunicação

A comunicação entre o módulo nRF24L01⁺ e o μ C é feita através da interface SPI. Os pinos necessários para o correto funcionamento da comunicação por SPI são: MISO (*Master Input Slave Output*), MOSI (*Master Output Slave Output Input*), SCK (*Serial Clock*), CE (*Chip Enable*), CSN (*Chip Select*) e IRQ (*Maskable interrupt*).

A Figura 4.2.9 ilustra o diagrama de blocos do módulo nRF24L01⁺. De seguida será realizada uma breve análise aos blocos *Register map*, *Enhanced ShockBurst Baseband Engine* e *Radio Control*.

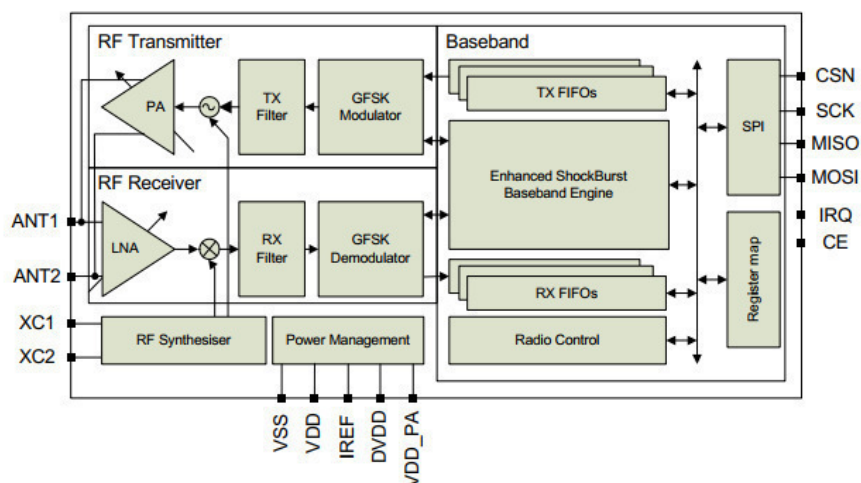


Figura 4.2.9 – Diagrama de blocos do transceiver nRF24L01⁺ (Adaptado de [37])

Bloco Register map

Este bloco possibilita a configuração e controlo dos blocos *Enhanced ShockBurst Baseband Engine* e *Radio Control*. A configuração e controlo são realizados através de 36 registos internos que este bloco representa, dos quais se destacam os seguintes:

- **RF_Channel** – registo que possibilita a escolha do canal frequência de transmissão [2.4 – 2.525] GHz;
- **SETUP_AW** – registo através do qual é possível configurar o tamanho do endereço de envio e receção [3 - 5] bytes;
- **RF_SETUP** – registo de configuração de potência e taxa de transmissão;
- **CONFIG** – registo onde se encontram os bits *PWR_UP* e *PRIM_RX*, que permitem a entrada na máquina de estados. Este permite ainda a determinação das fontes de interrupção no pino IRQ, definir o tamanho do CRC e se este é ou não utilizado;
- **STATUS** – registo que contém as *flags* IRQ;
- **FIFO_STATUS** – registo através do qual é possível verificar o estado das *FIFOS*.

Bloco Radio Control

A máquina de estados do bloco *Radio Control* encontra-se ilustrada na Figura 4.2.10, nesse diagrama são exibidos os seus quatro modos de operação (*Power Down*, *Standby*, *Rx* e *Tx Mode*) e o seu respetivo funcionamento. O controlo da máquina de estados é efetuado através do estado das *FIFOS*, do sinal CE e dos bits *PWR_UP* e *PRIM_RX*, do registo *CONFIG*.

- **Modo Power Down** – Neste modo o nRF24L01⁺ está desativado, reduzindo assim ao mínimo o consumo de energia, no entanto mantém todas as configurações efetuadas e permite realizar alterações nos registos de configuração;
- **Modo Standby-I** – Este modo minimiza o consumo energético e garante um curto tempo de alteração de estado para os modos *RX MODE* e *TX MODE*;
- **Modo RX** – Este modo coloca o nRF24L01⁺ em receção ativa, onde é constantemente desmodulando o sinal recebido e procurado um pacote valido. Essa validação ocorre através da verificação do endereço e CRC, caso o pacote seja validado a sua *payload* é colocada na *RX FIFO* e a receção sinalizada através do sinal IRQ;
- **Modo TX** – Este modo coloca o módulo em transmissão ativa, onde é verificado o estado da *TX FIFO* e, caso esta não esteja vazia, enviado o seu conteúdo para o canal de transmissão.

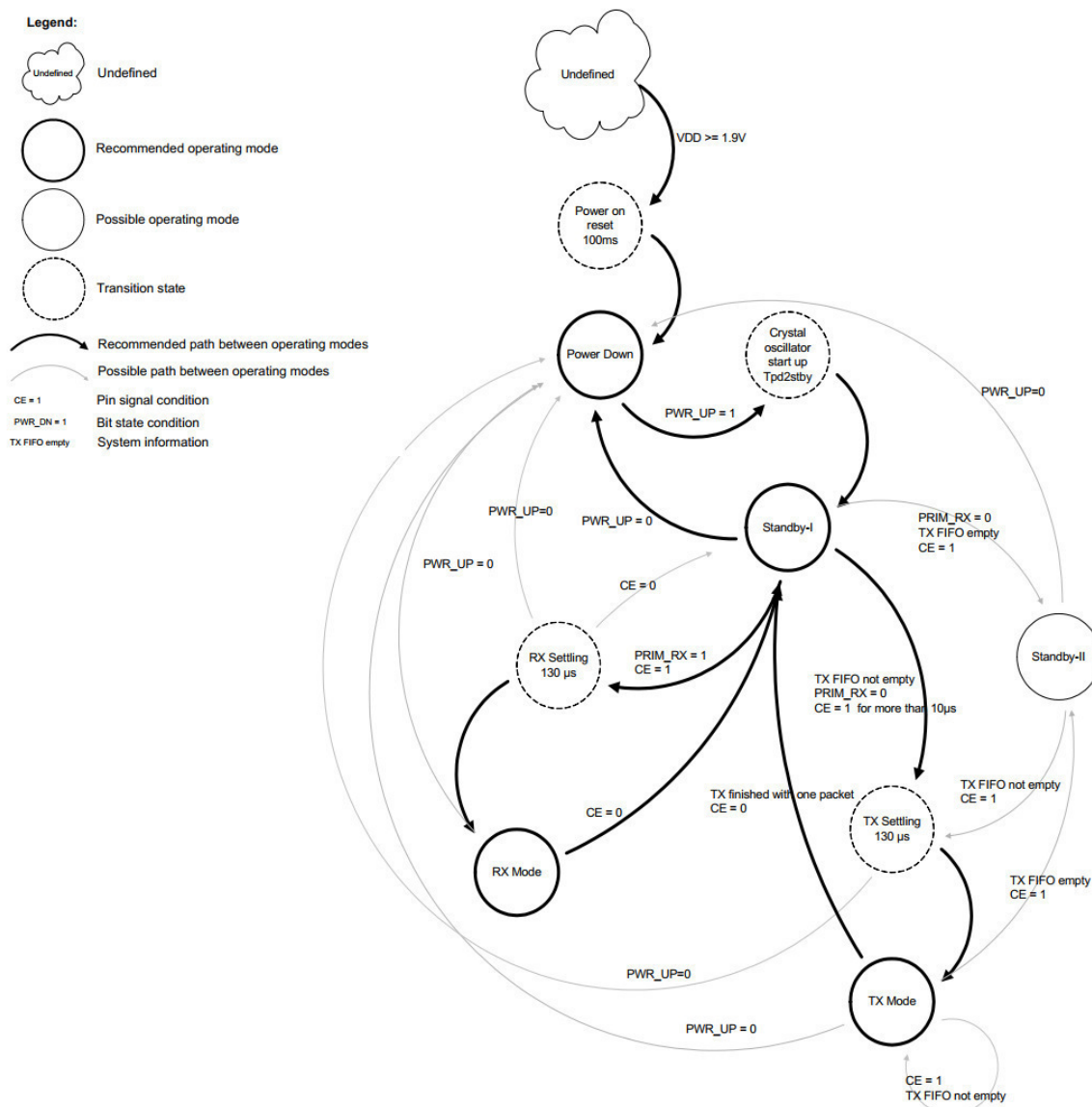


Figura 4.2.10 – Máquina de estados do bloco Radio Control (Adaptado de [37])

Bloco Enhanced ShockBurst Baseband Engine

O módulo nRF24L01⁺ funciona com base no protocolo ShockBurstTM e este bloco é o responsável por realizar a gestão desse protocolo (Figura 4.2.11) [37]. Os diversos campos do pacote de comunicação serão descritos de seguida:

- **Preamble** – sequencia de 8 bits alternados, 01010101 ou 10101010, usada para sincronização;
- **Payload** – campo de tamanho variável configurável ([1 – 32] bytes), onde é transmitida a informação definida pelo utilizador;

- **Address** – endereço do recetor, tamanho configurável na gama [3 - 5] *bytes*. Este campo permite o recetor assegurar que o pacote se destina a ele e desse modo prevenir troca de pacotes entre diferentes sistemas que utilizem o módulo nRF24L01⁺;
- **CRC** – campo que permite detetar erros no pacote, o seu tamanho ([1 - 2] *bytes*) é calculado através dos campos *Payload* e *Address*.

<i>Preamble</i> 1 <i>byte</i>	<i>Address</i> [3 - 5] <i>bytes</i>	<i>Payload</i> [1 - 32] <i>bytes</i>	CRC [1 - 2] <i>bytes</i>
-------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------

Figura 4.2.11 – Pacote comunicação ShockBurstTM com payload variável [1 - 32] *bytes*

A configuração dos campos que têm tamanho variável configurável é realizada via sequencia de comandos através de SPI.

Para que a troca de pacotes entre módulos nRF24L01⁺ se realize é necessário efetuar configurações entre em ambos os módulos. Os campos *Address* devem ter correspondência e o tamanho da *Payload* e CRC devem ser iguais.

Configuração mensagens

De forma a garantir a maior segurança na troca de mensagens, o campo *Address* foi configurado com 5 *bytes* e o CRC com 2 *bytes*. A *payload* foi configurada com uma dimensão de 20 *bytes* e a taxa de transferência foi definida como 250 *kbps*.

O módulo principal foi configurado para enviar 10 mensagens por segundo, ou seja, uma mensagem a cada 100 *ms*. O módulo secundário está à escuta e responde ao módulo principal sempre que recebe uma nova mensagem.

Algoritmo de Parsing – Envio Mensagem

A função de *parsing* da mensagem consiste no agrupamento da informação a enviar, tal como, dados controlo de velocidade, direção, sentido, geolocalização, entre outros. Cada módulo reúne e envia um conjunto de informações diferentes, a composição genérica de cada mensagem pode ser consultada no ponto 3.3.3 do capítulo 3.

As figuras 4.2.12 e 4.2.13, apresentam em detalhe a composição de dois tipos de mensagens. As mensagens de locomoção, que incluem dados de controlo de velocidade, direção e sentido, e são enviadas pelo módulo principal e as mensagens de geolocalização enviadas pelo módulo secundário.

0	1	2	4	9	10	13	18	19	20
Tip. Msg	Tip. Erro	Coord. Lat. Int.	Coord. Lat. Dec.	Coord. Lat. Card.	Coord. Long. Int.	Coord. Long. Dec.	Coord. Long. Card.	-	

Figura 4.2.12 – Composição detalhada mensagens geolocalização enviadas pelo módulo secundário

0	1	2	7	11	12	20
Tip. Msg	Código de Informação	Valor <i>duty-cycle</i> ESC	Valor <i>duty-cycle</i> direção	Sentido	-	

Figura 4.2.13 – Composição detalhada mensagens locomoção enviadas pelo módulo principal

Algoritmo de Parsing – Receção Mensagem

Quando o módulo principal, ou o secundário, recebe uma mensagem, há a necessidade de fazer o *parsing* dessa mensagem. O processo consiste em separar a informação de acordo com o seu tipo, sendo posteriormente armazenada nas respectivas estruturas. Dependendo do tipo de informação esta pode desencadear uma ação ou simplesmente ser armazenada.

Algoritmo de Envio/Receção de Mensagem

Na Figura 4.2.14 a) e b), encontram-se ilustrados os algoritmos de envio e receção de mensagem.

O envio de mensagem começa com o *parsing* da *payload*, seguindo-se a configuração do modo transmissão no módulo RF, a colocação da *payload* no *TX FIFO* e a alteração do pino CE para *HIGH* durante 10 *us*, de modo a sinalizar a intenção de envio de um pacote. Após os 10 *us*, o módulo transita para o estado *TX MODE* onde sincroniza a PLL (*Phase Locked Loop*) e começa a gerar a portadora. O algoritmo aguarda que esteja finalizada a sincronização, que é sinalizada através do pino IRQ. Quando o pino IRQ sinalizar o fim da operação é efetuado *reset à flag* de interrupção.

A receção de mensagem inicia com a configuração do modo receção e a colocação do pino CE a *HIGH*, obrigando assim o módulo a transitar para o estado *RX MODE* e a iniciar a sincronização da PLL. Finalizada a sincronização, o módulo começa a desmodular os sinais recebidos até encontrar um pacote com o endereço e CRC válidos. Enquanto os processos de sincronização e desmodulação ocorrem, o algoritmo realiza outras tarefas, sendo alertado para o fim da operação por via de uma interrupção externa gerada pelo pino IRQ. Finda a operação o pino CE é colocado a *LOW*, são lidos os dados da *RX FIFO*, é realizado *reset à flag* de interrupção e efetuado o *parsing* sobre a *payload* recebida.

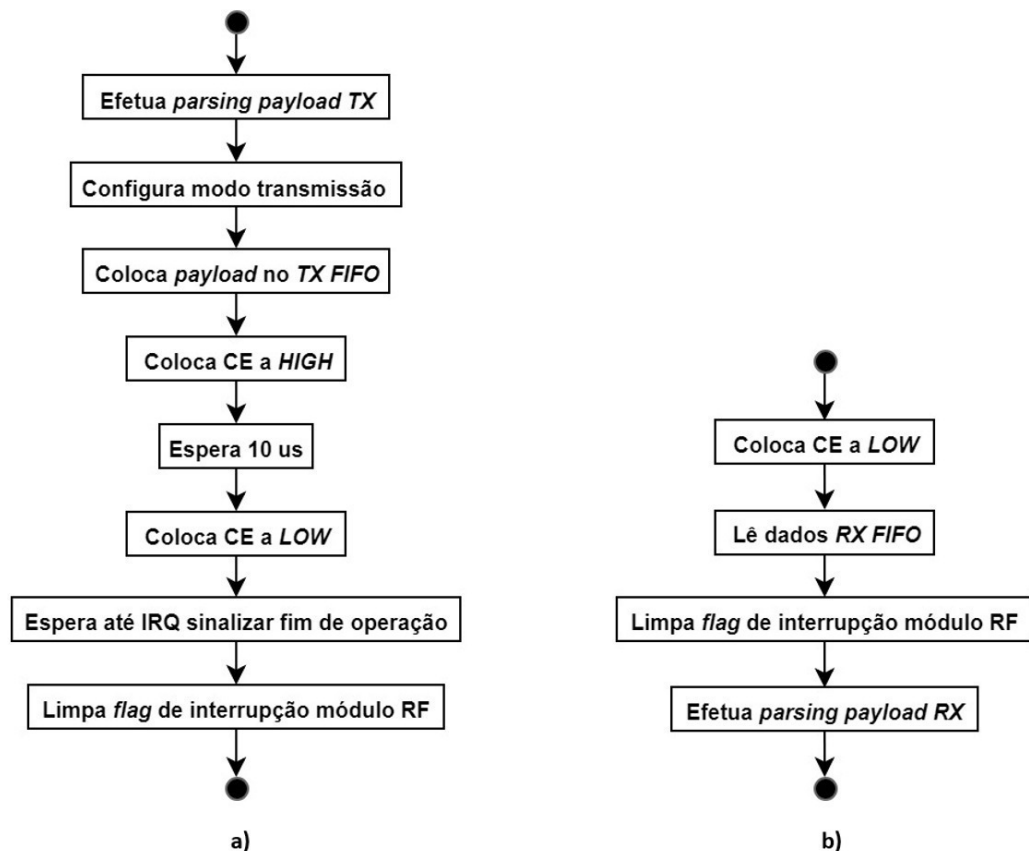


Figura 4.2.14 – a) Algoritmo de envio de mensagem; b) Algoritmo de recepção de mensagem

No módulo principal o evento de envio de mensagem é acionado por um *timer* configurado com um período de 100 *ms*. Terminado o processo de envio de mensagem ilustrado na Figura 4.2.14 a), o módulo RF é colocado no *RX MODE*, onde aguarda a recepção de uma nova mensagem. O módulo principal é alertado para a recepção de uma nova mensagem através de uma interrupção externa gerada pelo módulo RF. Após ser gerada a interrupção é executado o algoritmo ilustrado na Figura 4.2.14 b). O processo é repetido ciclicamente a cada 100 *ms*.

O módulo secundário atua de modo passivo, necessitando de receber uma mensagem para efetuar um envio. Ao contrário do que acontece no módulo principal, este começa por estar à escuta, sendo alertado para a recepção de uma nova mensagem através de uma interrupção externa produzida pelo módulo RF. Após ser gerado o alerta são executados de forma consecutiva os algoritmos de recepção e envio de mensagem ilustrados nas figuras 4.2.14 b) e a), respetivamente. Finda a execução de ambos os algoritmos, o módulo RF é novamente colocado à escuta no *RX MODE*, sendo o ciclo anterior repetido assim que for recebida uma nova mensagem.

4.3 Custo da Solução

Apesar da solução desenvolvida ser apenas um protótipo, neste ponto será estimado o custo total da solução tendo em consideração unicamente o custo dos componentes, sendo que o preço indicado para cada componente reflete o preço de compra de apenas uma unidade. O custo do casco não será incluído uma vez que este foi desenvolvido com recurso à reutilização de materiais disponíveis.

Somando o custo apresentado na subseções seguintes obtém-se um valor de custo total aproximado de 255 €, sendo que o módulo principal apresenta um custo aproximado de 25 € e o secundário de 230 €.

4.3.1 Sistema propulsão e direção

O preço total do conjunto do sistema de propulsão e direção listado na Tabela 4.3.1 é 163 €.

Componente	Unidades	Modelo	Fabricante	Preço por Unidade (€)
Motor	1	BL MOTOR 3670	-	28.00
ESC	1	120A ESC 4A UBEC	HobbyKing	43.00
<i>Water Jet</i>	1	KMB JET28	KEHRER MODELLB	53.00
Acessórios conexão	-	-	-	13.00
Servo	2	TowerProMG996R	-	13.00

Tabela 4.3.1 – Custo sistema propulsão que integra a solução proposta

4.3.2 Circuitos integrados e componentes passivos

O preço total do conjunto circuitos integrados e componentes passivos listados na Tabela 4.3.3 é de aproximadamente 11 €.

Componente	Unidades	Modelo	Fabricante	Preço por Unidade (€)
Resistência	6	-	-	0.30
Condensador	4	-	-	0.25
<i>Switch</i>	1	-	-	0.20
Regulador + 3.3V	2	LM2937-3.3	<i>Texas Instruments</i>	1.00
<i>Joystick</i>	2	-	-	3.00

Tabela 4.3.2 – Custo dos circuitos integrados e componentes passivos que integram a solução proposta

4.3.3 Periféricos

O preço total do conjunto dos periféricos listados na Tabela 4.3.3 é 33 €.

Componente	Unidades	Modelo	Fabricante	Preço por Unidade (€)
Módulo RF	2	nRF24L01+	NORDIC	10.00
GPS	1	NEO - 6M	u-Blox	13.00
μ C	2	DETPIC32	DETI	-

Tabela 4.3.3 – Custo dos periféricos que integram a solução proposta

4.3.4 Outros componentes

O preço total do conjunto de componentes da Tabela 4.3.4 é 44 €.

Componente	Unidades	Modelo	Fabricante	Preço por Unidade (€)
Antena RF	2	-	-	2.00
Bateria Barco	1	3s - 5000 mAh	Turnigy	35.00
Bateria Comando	1	1s - 2000 mAh	Turnigy	5.00

Tabela 4.3.4 – Custo componentes que integram a solução proposta

Capítulo V

Resultados e Análise

Sumário

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados alcançados referentes à aquisição de geolocalização, comunicação, eficiência energética, desempenho do hardware de propulsão e a usabilidade do sistema.

5.1 GPS

Nesta secção serão expostos e analisados os testes e resultados realizados ao tempo de aquisição de posição e exatidão da posição fornecida pelo módulo GPS.

5.1.1 Resultados

Aquisição de posição

Com mencionado anteriormente, o módulo GPS tem vários tipos de arranque, estando estes dependentes da informação ainda disponível no módulo quando é (re)iniciado. De seguida será realizada uma comparação entre os modos de arranques *Hot Start* e *Cold Start*, diferenciando-se estes pelos distintos tempos aquisição de posição válida.

Na Tabela 5.1.1 encontram-se registados os tempos de aquisição mínimo, médio e máximo obtidos através de 15 medições para cada modo de arranque. Para efetuar as medições do *Cold Start* o módulo foi totalmente desconectado da energia e reiniciado após 1 minuto, já para as medições do *Hot Start* o módulo foi igualmente desligado e reiniciado depois de 1 minuto, no entanto, foi mantida a alimentação de *backup*.

	Tipo de arranque	
	<i>Cold Start</i>	<i>Hot Start</i>
Tempo máximo (s)	55	11
Tempo médio (s)	44	7
Tempo mínimo (s)	39	3

Tabela 5.1.1 – Tempo aquisição de sinal do modo *Cold Start* e *Hot Start*

Exatidão

De modo a analisar a exatidão da aquisição de posição do módulo dependendo do número de satélites utilizados, foi executado um ensaio onde foram comparadas posições reais, obtidas através da ferramenta *Google Maps*, com posições dadas pelo módulo para diferentes números de satélites. Foram efetuadas 5 medidas para cada conjunto de satélites. Na Tabela 5.1.2 é apresentado o erro medio e máximo de posição e função do número de satélites utilizados.

Nº. Satélites	Erro médio (<i>m</i>)	Erro máximo (<i>m</i>)
4	8	10
5	10	12
6	5.5	7
7	5	6
8	3.5	4.5

Tabela 5.1.2 – Erro posição em função do número de satélites utilizados para adquirir a localização

5.1.2 Análise

Os resultados obtidos na aquisição de posição para os diferentes tipos de arranque, demonstram, tal como esperado, que o modo *ColdStart* aumenta significativamente o tempo de aquisição de posição. Fazendo uma comparação entre os tempos obtidos e os tempos indicados no *datasheet* do módulo, é possível verificar que os resultados experimentais, para ambos os modos, são significativamente superiores aos indicados pelo fabricante [38].

Através dos resultados de erro de posição presentes na Tabela 5.1.2, verifica-se a diminuição do erro consoante o aumento do número de satélites utilizados na obtenção da posição. Verifica-se ainda uma diminuição considerável do erro para posições adquiridas através de um número de satélites superior a 5, passando o erro médio de valores iguais ou superiores a 8 *m* para valores inferiores a 5.5 *m* e o erro máximo de valores superiores a 10 *m* para valores inferiores a 7 *m*.

5.2 Comunicação

Nesta secção encontram-se apresentados os resultados alcançados em diferentes testes referentes ao sistema de comunicação.

5.2.1 Resultados

Alcance comunicação

De modo a testar o alcance da comunicação e verificar a taxa de variação de erros com a distância, foram realizados um conjunto de testes. Para avaliar a qualidade da comunicação foram efetuados 100 ciclos de transmissão e receção para cada uma das distâncias, sendo 100 *ms* o *timeout* máximo para um pacote ser dado como perdido. Foram efetuadas medições a cada 10 *m*. O módulo secundário foi deslocando entre os diferentes pontos de medição enquanto que o módulo principal permaneceu estático. Em todos os testes efetuados as antenas de ambos os módulos permaneceram

paralelas entre si a uma altura compreendida no intervalo $[1 - 1.5] m$. As configurações do módulo nRF24L01+ para os diferentes testes podem ser consultadas na Tabela 5.2.1.

	Teste I	Teste II	Teste III	Teste IV	Teste V	Teste VI
Frequência (GHz)	2.44	-	2.44	2.44	2.44	2.44
Tamanho Payload (Bytes)	20	20	-	-	-	20
Tamanho Endereço (Bytes)	3	3	3	3	3	-
Tamanho CRC (Bytes)	2	2	2	2	2	-
Taxa de transmissão (Mbps)	0.250	0.250	0.250	1	2	0.250
Potência (dBm)	20	20	20	20	20	20
Antena (dBi)	2	2	2	2	2	2

Tabela 5.2.1 – Configurações módulo nRF24L01+ para cada teste

Teste I

O teste I foi realizado numa zona com um terreno bastante irregular e onde existiam alguns obstáculos, como árvores, entre o módulo principal e o módulo secundário (Figura 5.2.1). Existiam, ainda que de forma residual, algumas redes Wi-Fi. A Figura 5.2.2 contém os resultados obtidos no teste I, onde é possível verificar o número de pacotes recebidos em função da distância.



Figura 5.2.1 – Imagem aérea com relevo do local do teste II - Barragem Aguieira, Tábua

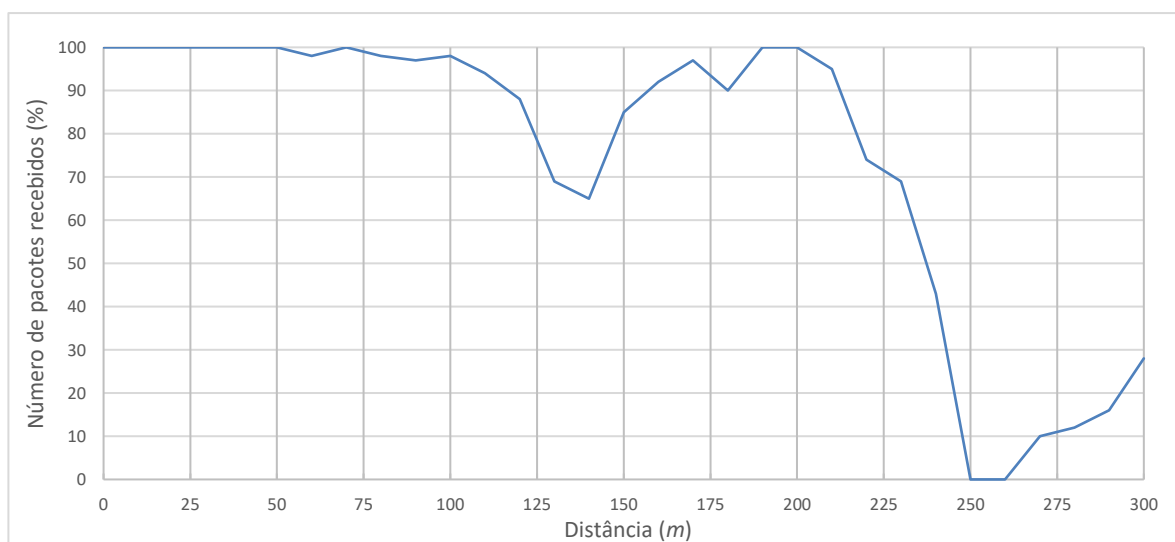


Figura 5.2.2 – Número pacotes recebidos em função da distância em terreno irregular - Teste I

Teste II

O teste II foi realizado numa zona com um terreno regular, sem obstáculos entre o módulo principal e módulo secundário e onde existia uma forte concentração de redes Wi-Fi nos intervalos [150 – 200] m e [320 – 370] m (Figura 5.2.3). Foram efetuados testes para quatro frequências de operação: [2.4; 2.44; 2.48; 2.5] GHz a uma taxa de transmissão de 250 kbps. Na Figura 5.2.4 encontram-se os resultados obtidos na realização do teste II.



Figura 5.2.3 – Imagem aérea local do teste II – Parque Verde do Mondego, Coimbra

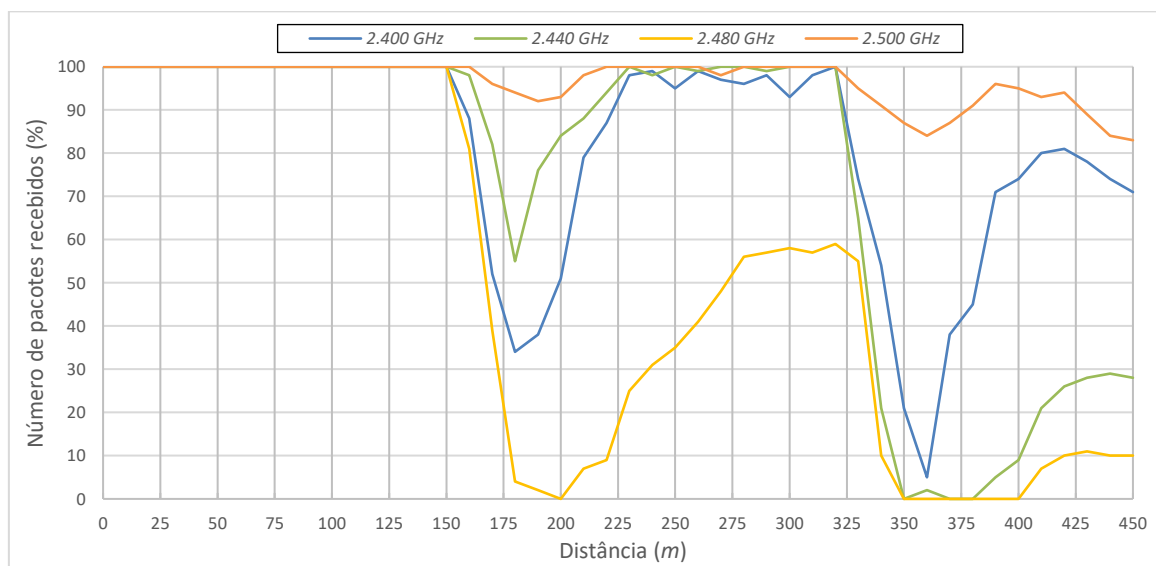


Figura 5.2.4 – Número pacotes recebidos em função da distância em zona com redes Wi-Fi - Teste II

Teste III, IV e V

Os testes III, IV e V foram realizados num corpo de água extenso, sem obstáculos entre os módulos e na ausência de qualquer rede Wi-Fi (Figura 5.2.5). Foram efetuados testes às três taxas de transmissão de dados suportadas pelo módulo ([0.250; 1; 2] Mbps). Para cada uma das velocidades de transmissão foram realizados três testes, variando em cada um deles o tamanho da *payload* a transmitir ([10; 20; 30] Bytes).

Na Figura 5.2.6 encontram-se os resultados obtidos na realização do teste III, número de pacotes recebidos em função da distância para 250 Mbps e diferentes tamanhos de *payload*.

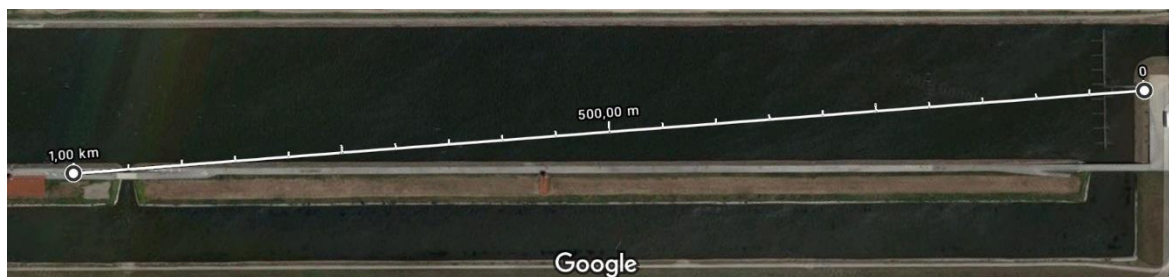


Figura 5.2.5 – Imagem aérea local teste III, IV, V e VI - CAR (Centro Alto Rendimento) de Montemor-o-Velho

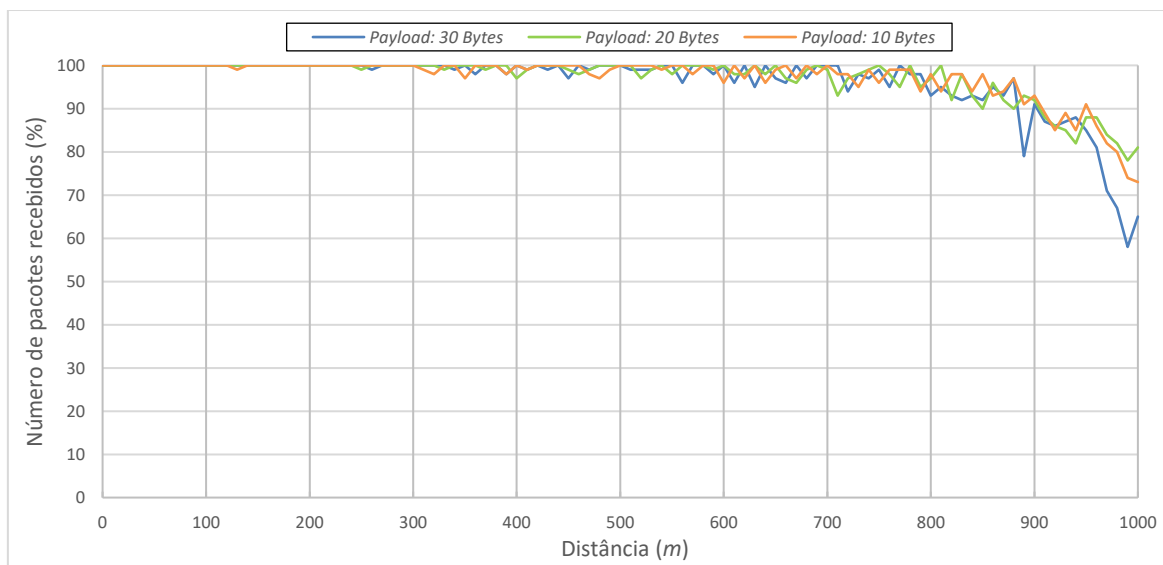


Figura 5.2.6 – Número pacotes recebidos em função da distância. Taxa transmissão: 250 Kbps - Teste III

A Figura 5.2.7 representa o número de pacotes recebidos em função da distância para uma taxa de transmissão de 1 Mbps e diferentes tamanhos de *payload*.

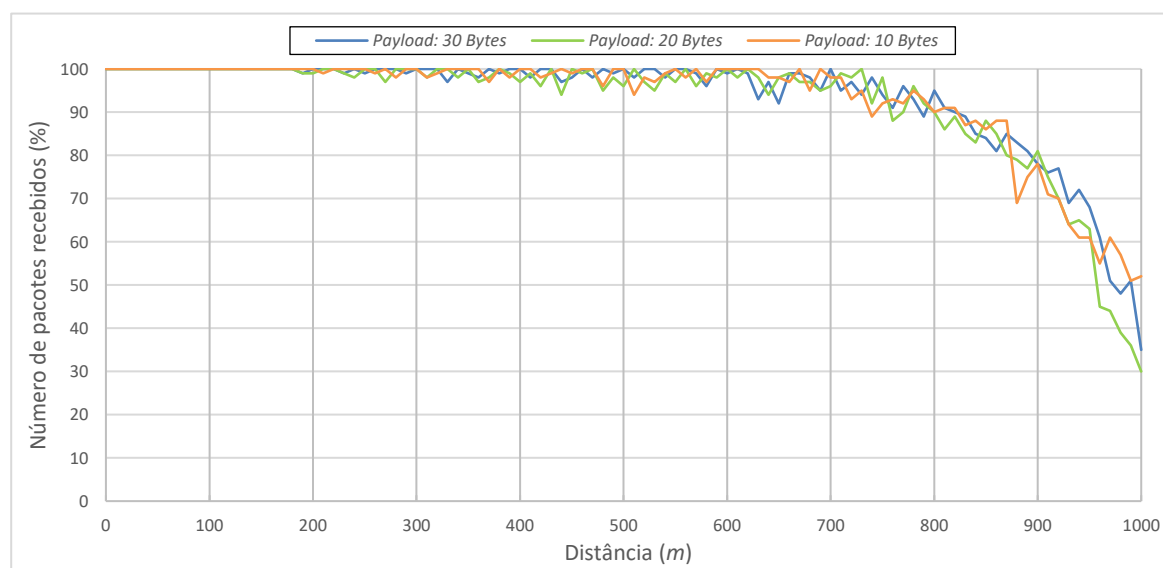


Figura 5.2.7 – Número pacotes recebidos em função da distância. Taxa transmissão: 1 Mbps - Teste IV

Na Figura 5.2.8 é possível verificar a variação de pacotes recebidos em função da distância para diferentes tamanhos de *payload* a uma taxa de transmissão de 2 Mbps.

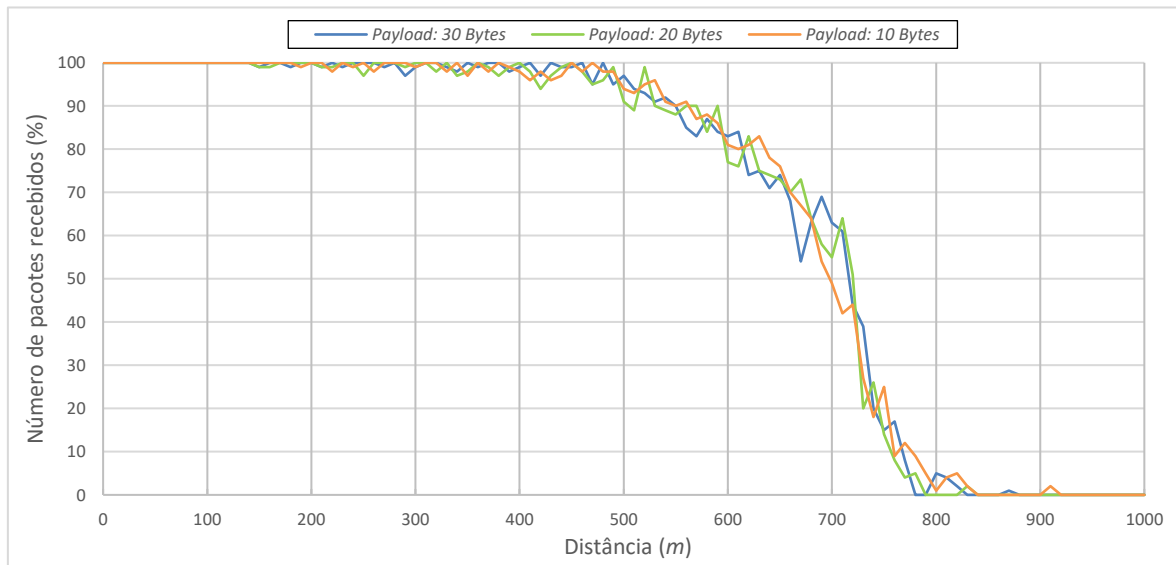


Figura 5.2.8 – Número pacotes recebidos em função da distância. Taxa transmissão: 2 Mbps - Teste V

Teste VI

O teste VI foi realizado nas mesmas condições e local dos testes III, IV e V, sendo que neste ensaio foram testados o número de pacotes recebidos em função da distância para diferentes dimensões de endereço e CRC a uma velocidade de 250 Kbps. Na Figura 5.2.9 encontram-se os resultados obtidos na realização do teste VI.

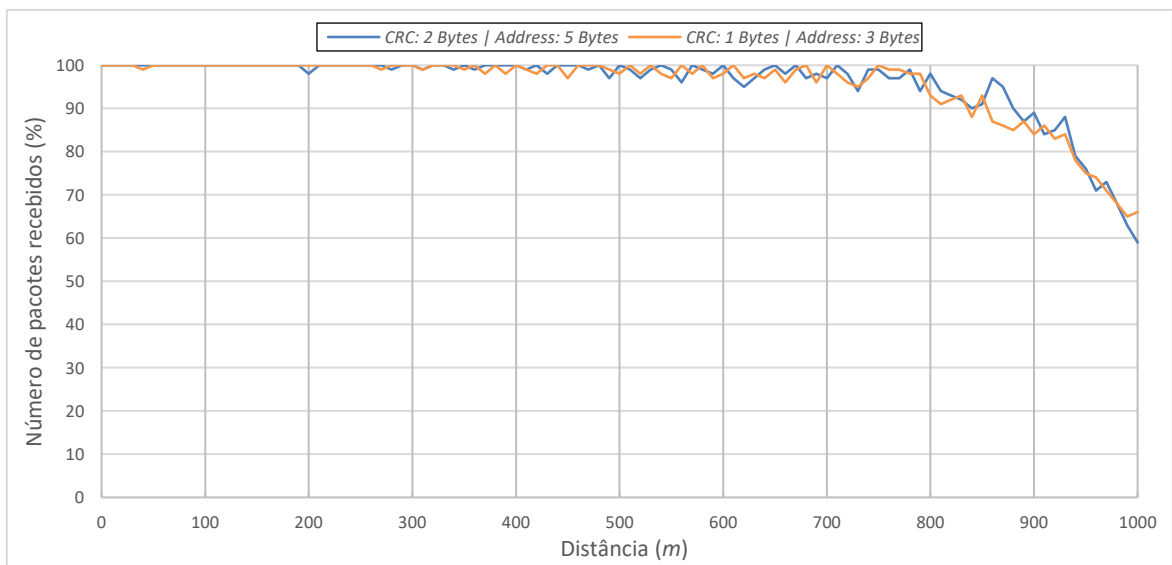


Figura 5.2.9 – Número pacotes recebidos em função da distância - Teste VI

5.2.2 Análise

Analisando os resultados do teste I verifica-se que mesmo num terreno bastante irregular e com obstáculos entre o módulo principal e secundário, existe uma transmissão estável até próximo dos 100 metros, distancia a partir da qual a comunicação se torna instável devido ao acumular de desníveis do terreno e obstáculos localizados entre os módulos.

Os resultados do teste II mostram a comunicação muito estável para qualquer uma das frequências testadas até uma distância de 150 metros, após essa distância, devido à grande concentração de redes Wi-Fi existentes na zona, ocorre uma quebra na estabilidade da comunicação entre os módulos. É possível verificar que o impacto das redes Wi-Fi é diferente para as diferentes frequências de transmissão utilizadas, sendo que na primeira zona de concentração, [150 – 200] *m*, a frequência de 2.5 *GHz* é a menos afetada, apresentando valores de pacotes recebidos perto de 100 %. Em oposição, o número de pacotes recebidos para frequência de 2.48 *GHz*, atinge valores próximos ou iguais a zero. Após a passagem pela primeira zona de redes Wi-Fi, ocorre uma recuperação considerável na quantidade de pacotes entregues para todas as frequências, sendo recuperada a estabilidade da comunicação em três das quatro frequências. No segundo local de concentração de redes Wi-Fi, no intervalo [320 – 370] *m*, ocorre uma enorme deterioração da comunicação para três das frequências, verificando-se uma quebra quase total da mesma, destacando-se, contudo, novamente a frequência 5.5 *GHz*, que apesar de apresentar uma variação no número de pacotes recebidos, mantém um número de pacotes entregues muito elevado (> 80). À medida que ocorre o afastamento da segunda zona, há uma recuperação no número de pacotes recebidos, no entanto, fruto das duas zonas de redes Wi-Fi e da distância de transmissão, a comunicação não volta a atingir níveis estáveis.

A tecnologia Wi-Fi opera nas bandas de frequência [2,4 – 2,4835] *GHz* e [5,470 – 5,725] *GHz*, coincidindo a primeira banda com parte da banda de frequência do módulo RF em teste, [2.4 – 2.525] *GHz*. Das quatro frequências utilizadas no ensaio apenas uma, 2.5 *GHz*, não é coincidente com frequências utilizadas pela tecnologia Wi-Fi, explicando-se desse modo os bons resultados obtidos por esta frequência no teste II.

Através dos resultados dos ensaios III, IV e V é possível constatar que a maior distancia de transmissão é alcançada com uma taxa de 250 *kbps*, atingindo distâncias máximas superiores a 1 *km*, comunicação livre de perdas até cerca dos 300 *m* e comunicação estável até aos 800 *m*, distância a partir da qual as perdas começam a ser próximas ou superiores a 10 pacotes em cada 100. Com a taxa de transmissão de 1 *Mbps* obtém-se comunicação sem perdas até próximo dos 200

metros, uma comunicação estável até distâncias entre os 600 e 700 m e distâncias máximas superiores a 1 km. Por último, com a taxa de transmissão mais elevada, 2 Mbps, é alcançada uma comunicação sem perdas até aos 150 m, uma comunicação estável até valores próximos dos 500 m e um alcance máximo de comunicação de cerca de 800 metros. Não se verifica através dos resultados dos ensaios realizados para as três taxas de transmissão que haja uma relação entre a dimensão da *payload* e o número de pacotes entregues com sucesso.

Observando os resultados do teste VI não são observáveis diferenças consideráveis de número de pacotes recebidos para diferentes dimensões de CRC e endereço.

Analisando os resultados de todos os ensaios constata-se que é possível ter uma comunicação estável a grandes distâncias (> 500 m) desde que o terreno seja regular e não existam obstáculos entre os módulos. Constata-se também que mesmo num terreno irregular e com obstáculos entre os módulos é possível garantir uma comunicação estável a distâncias consideráveis. Por fim é possível inferir que quanto menor a taxa de transmissão de dados, maior se torna o alcance da comunicação e que a mesma se torna bastante instável na presença de elevadas concentrações de redes Wi-Fi, dependendo, contudo, esta instabilidade da frequência utilizada para efetuar a comunicação.

5.3 Consumos Energéticos

Nesta secção serão apresentados e analisados os resultados dos consumos energéticos instantâneos obtidos através de testes realizados aos diferentes componentes do sistema. Os consumos instantâneos apresentados foram obtidos através do amperímetro *Range RE66*, sendo apresentado para cada caso o valor máximo medido.

5.3.1 Resultados

μC e Periféricos

Os valores de consumo energético obtidos para o μC e para os módulos de GPS e RF encontram-se na Tabela 5.3.1.

Periférico		Consumo (mA)
μC		79.5
GPS		43.1
Módulo RF	Transmissão	129.3
	Receção	28.7

Tabela 5.3.1 – Consumo energético μC e módulos GPS e RF

Servo

De forma a medir o consumo do servo foram realizados testes com e sem carga, sendo que para cada um deles foram efetuadas medições de consumo para uma posição fixa e para a transição de posição. Os testes com carga foram realizados na água com o motor a 50 % da potência.

Na Tabela 5.3.2 encontram-se os resultados dos consumos para os diferentes testes realizados.

	Estado	Consumo (mA)
Sem Carga	Fixo	4.4
	Transição	330.0
Com Carga	Fixo	11.3
	Transição	650.0

Tabela 5.3.2 – Consumo energético servo para diferentes estados

Motor

De modo a medir o consumo energético instantâneo do motor foram realizados testes com e sem carga. Para cada um dos testes foram efetuadas medições ao longo da gama de potência que é possível entregar ao motor.

Os resultados da corrente instantânea em função da potência fornecida ao motor, com e sem carga, encontram-se na Figura 5.3.1. O teste com carga foi realizado na água com a direção centrada.

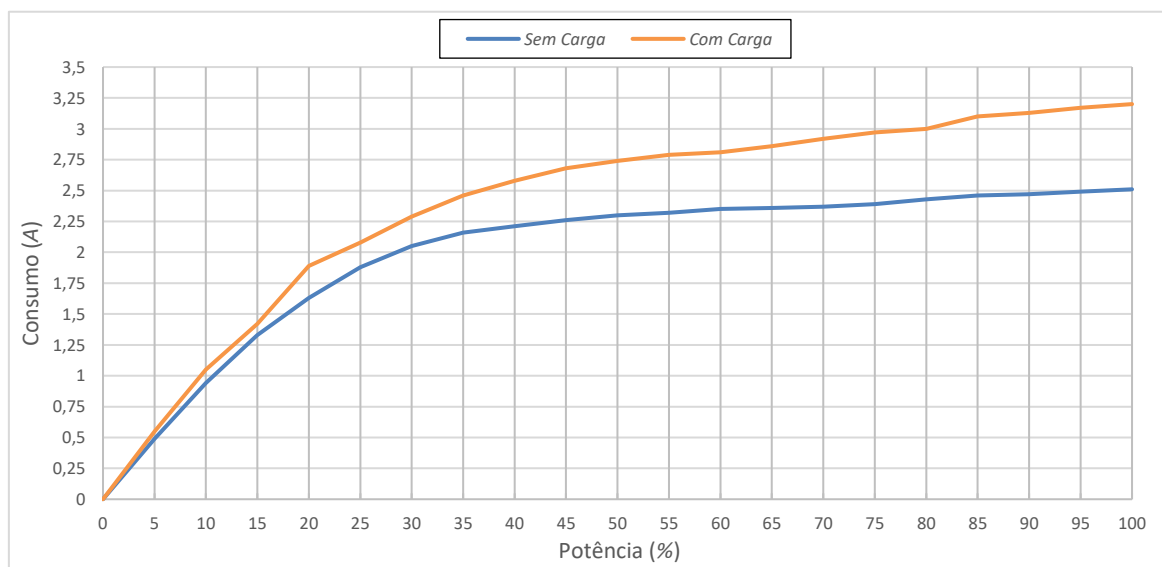


Figura 5.3.1 – Corrente instantânea em função da potência fornecida ao motor sem carga

5.3.2 Análise

Observando os valores de corrente instantânea do motor, com e sem carga, verifica-se que até próximos dos 40 % de potência, um incremento de potência de 5 % resulta num aumento do consumo de centenas de *mA*, a partir desse valor incrementos de 5 % resulta num aumento bastante inferior, na casa das dezenas de *mA*.

Os valores de consumo obtidos nos testes realizados aos servos e motor, apresentam um aumento significativo de consumo de corrente quando sujeitos a uma carga. O consumo de corrente do motor na presença de carga apresenta o aumento máximo para os 100 % de potência, aproximadamente 700 *mA*. Para o servo os valores de consumo no estado de transição praticamente duplicaram, apresentado um aumento de 320 *mA*. No estado fixo o valor de corrente apresentou um aumento de 6.9 *mA*.

Como forma de determinar a autonomia energética do módulo principal e secundário, foram considerados os valores da corrente instantânea de cada um dos componentes que compõem os módulos. Na Tabela 5.3.3 encontra-se o consumo energético e a percentagem de tempo que cada componente se encontra ativo. Para o motor foi considerado o valor da corrente instantânea para 50 % da potência obtido no teste com carga, 2740 *mAh*. Para os servos foi considerado o valor da corrente instantânea obtido para a posição fixa com carga, 11.3 *mAh*.

Periférico		Consumo (<i>mA</i>)	Tempo ON M.P. (%)	Tempo ON M.S. (%)
μC		79.5	100	100
GPS		43.1	-	100
Módulo RF	Transmissão	129.3	0.44	0.44
	Receção	28.7	16.8	99,56
Servo (fixo)		11.3 * 2	-	100
Motor (50 %)		2740.0	-	100

Tabela 5.3.3 – Consumo energético e percentagem de tempo a ON de cada componente para o módulo principal (M.P.) e módulo secundário (M.S.)

Somando os resultados dos consumos instantâneos dos componentes do módulo principal, obtém-se uma corrente instantânea de aproximadamente 85 *mA*. Fazendo uso da Equação 5.1 e considerado a bateria de 2000 *mAh* indicada em 4.1.10 no capítulo 4, obtém-se uma estimativa de autonomia de 23 horas e 30 minutos.

$$Autonomia = \frac{Capacidade\ Bateria\ (mAh)}{Consumo\ Instantaneo\ (mA)} \quad (horas) \quad (5.1)$$

A autonomia do módulo secundário obteve-se igualmente através da Equação 5.1. O valor da soma das correntes instantâneas é de 2914 mA, o que considerando a bateria de 5000 mAh indicada no ponto 4.1.10 do capítulo 4, resulta numa estimativa de autonomia de 1 hora e 43 minutos.

5.4 Usabilidade e Desempenho

Nesta secção serão expostos os testes realizados à manobrabilidade e desempenho da embarcação.

5.4.1 Resultados

Manobrabilidade e Desempenho

Foram realizados diversos ensaios de forma a testar a manobrabilidade e desempenho do sistema. Os testes realizados incluíram a medição de velocidade máxima, área necessária para efetuar a inversão de sentido, profundidade mínima das águas em que é possível navegar, navegação em água com ervas e usabilidade/condução da embarcação (Figura 5.4.1).



Figura 5.4.1 – Teste protótipo II em ambiente aquático com presença de ervas

Os resultados dos testes mesuráveis encontram-se na Tabela 5.4.1.

Velocidade máxima	2 m/s
Área necessária inversão sentido	1 m ²
Profundidade mínima navegável	0.01 m

Tabela 5.4.1 – Parâmetros mesuráveis desempenho embarcação

5.4.2 Análise

Nos testes realizados verificou-se que apesar de ser possível controlar a embarcação a longas distâncias, torna-se complicado efetuar o controlo da mesma à vista desarmada a partir dos 200 metros. Os testes efetuados à condução da embarcação revelaram um sistema bastante intuitivo com resposta rápida e eficaz aos comandos efetuados.

Nos testes em águas com a presença de ervas o propulsor não ficou preso ou diminuiu o seu desempenho.

5.5 Sistema

Na presente secção serão apresentados os resultados gerais, assim como as características finais, do sistema.

5.5.1 Resultados

A Tabela 5.5.1 contém os resultados gerais obtidos nos testes das secções anteriores, as características e as funcionalidades do sistema.

Massa			1.5 kg
Tipo de casco			Trimarã
Dimensões		Barco	40 cm x 60 cm x 15 cm
		Comando	-
Comunicação	Controlo remoto	Tecnologia	RF – 2.4 GHz
		Alcance	800 m
	Dados	Tecnologia	RF – 2.4 GHz
		Alcance	800 m
	Vídeo	Não aplicável	-
Bateria barco		Tecnologia	Li-Po
		Tensão	11.1 V
		Capacidade	5 Ah
		Autonomia	[1 – 2] horas
Sistema propulsão		Motor	BrushlessMotor
		Propulsor	Water Jet
		Velocidade max.	2 m/s
Operação		Navegação	Manual
		Controlo	Comando
Geolocalização			GPS
Preço sistema			255 €

Tabela 5.5.1 – Principais características do protótipo II

5.5.2 Análise

Analisando a Tabela 5.5.1, e as tabelas dos sistemas Baitboat, ESM30 e Heron da secção 2.1 do capítulo II, verifica-se que o alcance de comunicação do **protótipo II** (800 m) é superior ao alcance do Heron (500 m) e do Baitboat (300 m), e cerca de duas vezes inferior ao ESM30 (2 km).

O **protótipo II** tem velocidade máxima (2 m/s) superior ao Heron (1.7 m/s) e ao ESM30 (1.5 m/s), e uma autonomia ([1 – 2] horas) inferior as três embarcações (Heron [2 – 3] horas, Baitboat [4 – 5] horas e ESM30 [3 – 4] horas).

Todos os sistemas utilizam o sistema de geolocalização GPS, o **protótipo II**, tal como o Heron, só têm navegação manual, o ESM30 e o Baitboat têm navegação manual e autónoma. A massa e as dimensões do **protótipo II** são inferiores à de todos os restantes sistemas, considerando, no entanto, que o casco deste é apenas um protótipo.

Capítulo VI

Conclusões e Trabalho Futuro

Sumário

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido nesta dissertação, sugestões de melhorias e alterações a serem realizadas num trabalho futuro.

6.1 Conclusões

Analisando os objetivos propostos na secção 1.3 do capítulo I, é possível asseverar que foram cumpridos quase na totalidade. Desenvolveu-se com êxito um protótipo que inclui, tanto na componente de *firmware* como de *hardware*, praticamente a totalidade das funcionalidades propostas para o sistema, particularmente a geolocalização, a comunicação sem fios a longas distâncias e o sistema de locomoção próprio em ambiente aquático.

O sistema de propulsão revelou-se adequado ao sistema, visto que o propulsor garantiu os níveis de segurança desejados, foi capaz movimentar o barco, navegar em águas rasas e garantir uma boa manobrabilidade. O conjunto motor/controlador (ESC) revelaram-se capazes de fornecer ao propulsor a potência necessária para que a movimentação do barco ocorresse dentro do previsto.

Em termos de especificações de funcionamento, foram implementadas com sucesso todas as funcionalidades definidas no ponto 3.2.1 do capítulo 3, à exceção do retorno automático para junto do operador em caso de falha de comunicação e da leitura do nível de bateria. As funcionalidades são garantidas através de máquinas de estado que garantem o bom funcionamento do sistema e fazem a gestão entre os *inputs* do operador e os vários atuadores e periféricos do sistema. Apesar de não ter sido implementado o sistema de retorno automático, foi implementado um sistema, que em caso de quebra de comunicação entre o módulo principal e o módulo secundário, imobiliza o barco até que a comunicação seja reestabelecida ou o barco seja recolhido de forma manual.

O sistema de geolocalização selecionado revelou-se eficaz, garantindo resultados dentro do esperado. De forma a garantir melhores resultados na exatidão da posição, e com base nos dados dos testes realizados em 5.1.1, o módulo GPS foi configurado para aceitar apenas coordenadas de geolocalização obtidas através de 6 ou mais satélites.

Em termos de comunicação, os testes efetuados ao módulo nRF24L01⁺, comprovam que foi efetuada a escolha acertada para estabelecer as comunicações no panorama deste projeto, visto que demonstrou ser capaz de comunicar a grandes distâncias (500 m) garantindo a estabilidade de comunicação. Os testes permitiram ainda concluir que, embora a distâncias mais reduzidas, o módulo é capaz de assegurar a comunicação em zonas em que existam obstáculos entre os dois módulos do sistema. Para além disso, o facto de operar na banda ISM evita custos monetários adicionais para garantir a operação de comunicação.

A autonomia energética do módulo secundário, 1 hora e 43 minutos, não cumpriu o valor dos requisitos (3 horas), contudo, este problema é facilmente ultrapassável através da colocação em paralelo de uma bateria características iguais à utilizada.

Por fim é possível concluir que o sistema de controlo físico desenvolvido para interagir com o operador se revelou eficaz, simples e intuitivo, sendo que sem grande experiência é possível operar o barco e recolher as informações desejadas com facilidade.

6.2 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido nesta dissertação consistiu numa abordagem inicial ao problema, como tal e visualizando o sistema de uma perspetiva global, são várias as vertentes do trabalho desenvolvimento que merecem ser melhoradas, bem como devem ser desenvolvidas novas funcionalidades para adicionar ao sistema. Nesta secção são realizadas algumas sugestões de trabalho a ser realizado no futuro, por forma a aperfeiçoar o sistema.

Deve ser realizado um estudo de novas soluções para o sistema computacional, visto que o sistema utilizado se trata de uma placa de desenvolvimento. É necessário encontrar um sistema adequado às necessidades do projeto.

No futuro deve ser desenvolvida uma PCB (*Printed Circuit Board*) de modo a encapsular o sistema de alimentação, todas as ligações dos periféricos e o sistema de controlo utilizado pelo operador.

De forma a mitigar as dificuldades de navegação a longas distâncias deve ser adicionado ao barco uma câmara com transmissão de imagem em tempo real para o operador. Ao nível de periféricos deve ainda ser adicionado um sistema de deteção de objetos, para evitar que este colida contra objetos, a margem do corpo de água e eventuais nadadores, e sensores que permitam detetar a entrada de água na embarcação e alertar o operador para que este tome medidas que minimizem os estragos nos componentes internos.

Ao nível de *software* sugere-se o desenvolvimento de uma plataforma capaz de interagir com o sistema, armazenar e tratar os dados recolhidos por este.

Por fim, como sugestão de trabalho futuro, é sugerido que seja desenvolvido um sistema que, através do fornecimento de coordenadas geográficas, se desloque de forma automática e autónoma até uma determinada localização dentro de um corpo de água. De forma a alcançar melhores resultados no processo, sugere-se a utilização de um sistema de geolocalização que garanta maior exatidão, uma vez que o módulo utilizado apresenta resultados interessantes para uma prova de conceito, no entanto, estes não cumprem as exigências necessárias para uma navegação autónoma eficiente.

Bibliografia

- [1] IUCN, “Water is the source of all life and needs to be managed carefully.” [Online]. Available: <https://www.iucn.org/theme/water>. [Accessed: 03-May-2018].
- [2] UNESCO, “Water is the source of all life and needs to be managed carefully.” [Online]. Available: http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Venice/pdf/special_events/bozza_scheda_DOW02_1.0.pdf. [Accessed: 03-May-2018].
- [3] Pacific Water, “Water Distribution.” [Online]. Available: <http://www.pacificwater.org/pages.cfm/water-services/water-demand-management/water-distribution?printerfriendly=true>. [Accessed: 04-May-2018].
- [4] UN WATER, “The answer is in Nature” [Online]. Available: <http://worldwaterday.org/> [Accessed: 04-May-2018].
- [5] M. O. SILVA., S. N. DE ABREU., and R. M. MARTINS, “DISPOSITIVO NAVEGÁVEL AUTÓNOMO NÃO TRIPULADO E SUA UTILIZAÇÃO,” PT Patent 107219, Oct.11, 2013.
- [6] New Direction, “Bluetooth Smart Bait Boat.” [Online]. Available: <https://www.newdirectiontackle.co.uk/Baitboat.php#to-top> [Accessed: 08-Aug-2018].
- [7] Oceanalpha, “Oceanalpha USV - Model ESM30 - Autonomous Water Sampling & Autonomous Water Monitoring Boat” [Online]. Available: <https://www.environmental-expert.com/products/oceanalpha-usv-model-esm30-autonomous-water-sampling-autonomous-water-monitoring-boat-551457> [Accessed: 09-Aug-2018].
- [8] Clearpath Robotics, “HERON - UNMANNED SURFACE VESSEL” [Online]. Available: <https://www.clearpathrobotics.com/heron-unmanned-surface-vessel/> [Accessed: 11-Aug-2018].
- [9] Clearpath Robotics, “Heron User Manual”.

- [10] SALTICK, “Oceanalpha M40-ASV” [Online]. Available: <https://saltkick.com/Oceanalpha-M40-ASV/> [Accessed: 10-Sep-2018].
- [11] ASV, “C-Worker 4” [Online]. Available: <https://www.asvglobal.com/product/c-worker-4/> [Accessed: 10-Sep-2018].
- [12] Subsea Tech, “Cat Surveyor” [Online]. Available: <https://www.subsea-tech.com/cat-surveyor/> [Accessed: 10-Sep-2018].
- [13] SALTICK, “Oceanalpha L30-ASV” [Online]. Available: <https://saltkick.com/Oceanalpha-L30-ASV/> [Accessed: 10-Sep-2018].
- [14] Naval Technology, “Seagull Unmanned Surface Vessel (USV)” [Online]. Available: <https://www.naval-technology.com/projects/seagull-unmanned-surface-vessel-usv/> [Accessed: 10-Sep-2018].
- [15] NauticEXPO, “OCEANOGRAPHIC SURVEY MARINE DRONE” [Online]. Available: <http://www.nauticexpo.com/prod/smart-own/product-58033-469876.html> [Accessed: 10-Sep-2018].
- [16] Hobby Media, “Catamarano brushless Pro Boat – Miss Geico 29 RTR” [Online]. Available: <http://www.hobbymedia.it/25204/catamarano-brushless-pro-boat-miss-geico-29-rtr> [Accessed: 14-May-2018].
- [17] Instructor Resources, “Hull Types & Engine Drives” [Online]. Available: <https://www.instructortoolkit.co.uk/instructor-resources/powerboat-instructor-resources/anchoring/hulls-engines/> [Accessed: 15-May-2018].
- [18] “Ship’s Waterjet system”, [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Ship%27s_Waterjet_system_%28cut_view%29_NT.PNG [Accessed: 20-May-2018].
- [19] C. B. Silveira, “Motor CC: Saiba como Funciona e de que forma Especificar” [Online]. Available: <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/> [Accessed: 18-May-2018].
- [20] N. G. Ferraro, “Os Fundamentos da Física” [Online]. Available: <http://osfundamentosdafisica.blogspot.pt/2011/11/cursos-do-blog-eletricidade.html> [Accessed: 11-May-2018].

- [21] Physics, “Lorentz force, must there be two magnets” [Online]. Available: <https://physics.stackexchange.com/questions/107067/lorentz-force-must-there-be-two-magnets> [Accessed: 08-May-2018].
- [22] Cyril Buttay, “The two basic states of a H-bridge” [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_H [Accessed: 11-May-2018].
- [23] Mike Rycroft, “Brushless DC motors gain in popularity” [Online]. Available: <http://www.ee.co.za/article/brushless-dc-motors-gain-popularity.html> [Accessed: 12-Jun-2018].
- [24] Electronics Tutorials, “Three Phase Transformers” [Online]. Available: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/three-phase-transformer.html> [Accessed: 29-May-2018].
- [25] Flex Innovations, “SKYWALKER 80A-OPTO ESC (NO BEC)” [Online]. Available: <https://www.flexinnovations.com/product-p/ftvhw bq8012.htm> [Accessed: 12-May-2018].
- [26] Learn Engineering, “Brushless DC Motor, como funciona?” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac&feature=youtu.be&t=36> [Accessed: 12-May-2018].
- [27] Owen Duffy, “Sensor brushless DC motor - an explanation” [Online]. Available: <https://www.owenduffy.net/rc/BLDC/index.htm> [Accessed: 23-Jul-2018].
- [28] Slot Arrábida Rádio Control, “MOTOR GO 21 3T” [Online]. Available: <http://slotarrabida.pt/rc/motores-nitro/2229-motor-go-21-3t-carrancador.html> [Accessed: 29-Sep-2018].
- [29] Adilson Thomsen, “Comunicação wireless com o módulo NRF24L01” [Online]. Available: <http://buildbot.com.br/blog/comunicacao-wireless-com-o-modulo-nrf24l01/> [Accessed: 29-May-2018].
- [30] Potential Labs, “Ublox Neo-6M GPS Module” [Online]. Available: <https://potentiallabs.com/cart/buy-ublox-neo-6m-gps-module-online-india> [Accessed: 23-May-2018].

- [31] Valarm, “Remotely Monitoring Water Quality – Managing Water Resources and Quality” [Online]. Available: <http://www.valarm.net/blog/water-quality-telemetry-remote-monitoring/> [Accessed: 26-Jun-2018].
- [32] Xylem, “YSI EMM 2.0 Coastal Buoy 23” [Online]. Available: <https://www.xylem-analytics.asia/productsdetail.php?YSI-EMM2.0---Coastal-Buoy-23> [Accessed: 26-Jun-2018].
- [33] Sampling Systems, “TeleScoop” [Online]. Available: <https://www.sampling.com/TeleScoop.html> [Accessed: 26-Jun-2018].
- [34] J.L. Azevedo, “DETPIC32, V2”, 2011.
- [35] Microchip, “PIC32MX7XX Family Data Sheet”, 2010.
- [36] Chengdu Ebyte Electronic Technology, “E01-ML01DP5_Datasheet_V1.0”, 2015.
- [37] NORDIC, “NRF24L01+ Product Specification”, 2008.
- [38] U-blox, “u-blox 6 - Receiver Description”, 2013.
- [39] SRPASSIVES, “GPS Internal Active Antenna Model : GPS-ANT050-7”.
- [40] Kehrer Modellbau, “KMB JET28 (rev. 3) similar RIVA-CALZONI” [Online]. Available: <https://www.kehrer-modellbau.de/en/kmb-jet28/jet-drives/kmb-jet28-rev.-3-similar-riva-calzoni> [Accessed: 10-May-2018].
- [41] Alexnld, “3670 4 POLES 2150KV BRUSHLESS MOTOR FOR RC 1/8 1/10 OFF-ROAD MONSTER CAR BOAT (BLUE)” [Online]. Available: <https://alexnld.com/product/3670-4-poles-2150kv-brushless-motor-for-rc-1-8-1-10-off-road-monster-car-boat-blue/> [Accessed: 09-Jun-2018].
- [42] HobbyKing, “HobbyKing 120A Boat ESC 4A UBEC” [Online]. Available: https://hobbyking.com/en_us/hobbyking-120a-boat-esc-4a-ubec.html?__store=en_us [Accessed: 10-Jun-2018].
- [43] “MG996R High Torque - Metal Gear Dual Ball Bearing Servo”.

- [44] Nikolaos Tsipas, “Controlling a servo using Raspberry Pi and WiringPi software based PWM” [Online]. Available: <http://projectedneuralactivity.blogspot.com/2012/12/controlling-servo-using-raspberry-pi.html> [Accessed: 20-Jun-2018].
- [45] Guilherme Costa, “Joystick Schematic Diagram” [Online]. Available: <http://www.guilhermecosta.co/wire/joystick-schematic-diagram.html> [Accessed: 27-Jun-2018].
- [46] P.M.M da Silva, “Aplicação de Filtro de Kalman Estendido na estimação de Estado de Carga de um Sistema de Gestão de Baterias”, M.S. thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, PT, 2016.
- [47] HobbyKing, “Turnigy 5000 mAh 3S 25C Lipo Pack W/XT-90” [Online]. Available: https://hobbyking.com/pt_pt/turnigy-battery-5000mah-3s-25c-lipo-pack-xt-90.html [Accessed: 28-Jun-2018].
- [48] HobbyKing, “Turnigy 2000 mAh 1S 1C Lipo w/2 Pin JST-PH Connector” [Online]. Available: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-2000mah-1s-1c-lipoly-w-2-pin-jst-ph-connector.html?__store=en_us [Accessed: 28-Jun-2018].

Apêndice A

A.1 Funcionamento Motor DC

Num motor *brushed* o estator tem ímanes acoplados na sua face interna, criando desse modo um campo magnético constante, \mathbf{B} , que atravessa o rotor (Figura A.1.1). O rotor é constituído por um material ferromagnético envolto em enrolamentos condutores (ex: fio de cobre). Esses enrolamentos são bobinas de n espiras isoladas entre si, que quando percorridos por uma corrente formam um eletroímã.

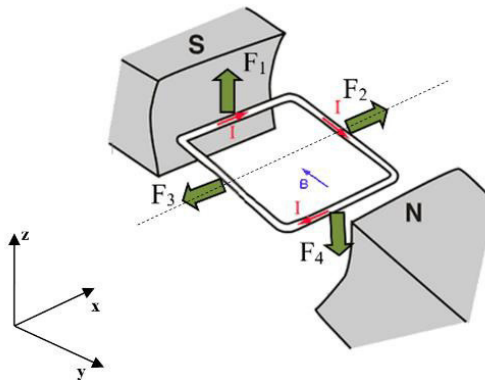


Figura A.1.1 – Ilustração das forças, F , aplicadas a uma espira percorrida por uma corrente, I , na presença de um campo magnético, B . (Adaptado de [19])

Quando um condutor, colocado sobre um campo magnético, \mathbf{B} , é percorrido por uma corrente elétrica, I , é gerada sobre este uma força eletromagnética, \mathbf{F}_m , que o faz mover. Esta força é denominada *Força de Lorentz* e a sua direção e sentido podem ser obtidos através da chamada regra dos três dedos ou regra da mão esquerda de *Fleming's* (Figura A.1.2). A direção da força magnética é perpendicular à direção da corrente e do campo magnético, que por sua vez são perpendiculares entre si.



Figura A.1.2 – Regra da mão esquerda de Fleming's, que estabelece a relação entre I , B e F_m (Adaptado de [20] e [21])

O Força de Lorentz num condutor é dada pela Equação A.1,

$$F = B * L * I * \sin(\alpha) \quad (N) \quad (A.1)$$

onde F é a força em Newtons (N), B a densidade de fluxo magnético em tesla (T), L o comprimento do condutor sob o campo magnético em metros (m), I a corrente que atravessa o condutor em amperes (A) e α o ângulo que I forma com B .

A Figura A.1.3 ilustra as forças aplicadas a uma espira percorrida por uma corrente, quando exposta a um campo magnético. Recorrendo à Equação A.1 obtemos as forças F_1 , F_2 , F_3 e F_4 (Equação A.2). As forças F_1 e F_4 , assim como as forças F_2 e F_3 , tem o mesmo módulo, mas sentidos opostos. As forças F_2 e F_3 , anulam-se, pois atuam sobre o mesmo eixo, enquanto que as forças F_1 e F_4 , por atuarem sobre eixos diferentes, produzem um torque que faz a espira rodar no sentido horário.

$$\begin{aligned} F_1 &= B * L * I * \sin(\alpha) \quad (N), \text{ sentido } +z \\ F_2 &= B * L * I * \sin(\alpha) \quad (N), \text{ sentido } +x \\ F_3 &= B * L * I * \sin(\alpha) \quad (N), \text{ sentido } -x \\ F_4 &= B * L * I * \sin(\alpha) \quad (N), \text{ sentido } -z \end{aligned} \quad (A.2)$$

Quando o plano da espira coincidir com o plano $z - x$, o par $F_1 - F_4$, também estará sobre o mesmo eixo, deixando nesse momento de existir torque e consequentemente movimento.

No momento em que o enrolamento em torno de um rotor, que se encontra sob o campo magnético gerado pelo estator, é percorrido por uma corrente elétrica, ocorre o fenómeno anteriormente

descrito. A soma das forças eletromagnéticas no enrolamento gera um torque que resulta na rotação do rotor (Figura A.1.3).

O torque na espira é dado pela Equação A.3,

$$T = B * A * I * \cos(\alpha) \quad (N/m) \quad (A.3)$$

em que T é o torque em Newtons por metro (N/m), B a densidade de fluxo magnético em tesla (T), A a área da espira em metros (m^2), I a corrente que atravessa o condutor em amperes (A) e α o ângulo que o plano da espira A forma com B .

À medida que o ângulo α aumenta, o torque vai diminuindo, até se tornar nulo quando α atinge os 90° . De forma a contornar esta variação, tornar o movimento do rotor mais uniforme e aumentar o torque, são adicionados n enrolamentos, isolados entre si, em torno do rotor. O rotor tem acoplado a si um anel comutador de forma cilíndrica, este é composto por diversas lâminas, isoladas entre si, às quais estão conectados os enrolamentos. Sobre o anel encostam duas escovas, que estão fixas e ligadas aos terminais da fonte de alimentação. A corrente é encaminhada para o enrolamento através do contacto das escovas com o anel comutador. À medida que o rotor se move, ocorre a comutação entre enrolamentos, sendo que a cada meia volta o sentido da corrente na espira inverte, garantindo desse modo continuação do movimento no mesmo sentido.

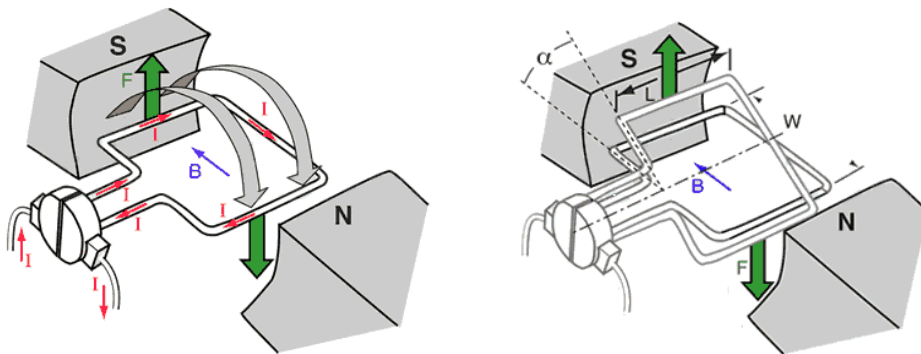


Figura A.1.3 – Representação de motor DC de 2 polos e um enrolamento. (Adaptado de [19])

A.2 Funcionamento Motor BLDC

Um motor *brushless* de corrente contínua (BLDC), tal como o nome indica, não usa escovas. Ao contrário dos motores DC, estes têm ímanes acoplados ao rotor e é o estator que é constituído por um material ferromagnético envolto em enrolamentos condutores.

Tal como nos motores DC, o seu funcionamento assenta na interação de forças eletromagnéticas, neste caso entre os ímanes do rotor e os eletroímãs do estator. Quando um enrolamento do estator é conectado a uma fonte de alimentação DC, torna-se num eletroímã. Os polos opostos do íman do rotor e do eletroímã do estator são atraídos um pelo outro, forçando o rotor a movimentar-se. De modo a garantir a continuidade do movimento, à medida que os polos do rotor ficam alinhados com os polos do estator, a alimentação passa para o enrolamento seguinte. Visualizando a Figura A.2.1, percebe-se que quando o rotor alcança o enrolamento **C** a alimentação comuta para o enrolamento **B**, voltando a comutar quando o rotor alcança o enrolamento **B**, desta vez para o enrolamento **A**. Quanto o rotor alcança o enrolamento **A**, perfazendo meia volta, o enrolamento **C** é alimentado com a polaridade oposta. O processo é repetido e o rotor continua o seu movimento de rotação.

O motor da Figura A.2.1 alimenta apenas um enrolamento a cada instante, deixando sempre dois enrolamentos em aberto. Fazendo uso de dois enrolamentos simultaneamente é possível aumentar a potência do motor e tornar o torque constante, visto que tal como acontece no Motor DC, o torque diminui à medida que o rotor e o estator se alinham de acordo com as forças eletromagnéticas produzidas por ambos.

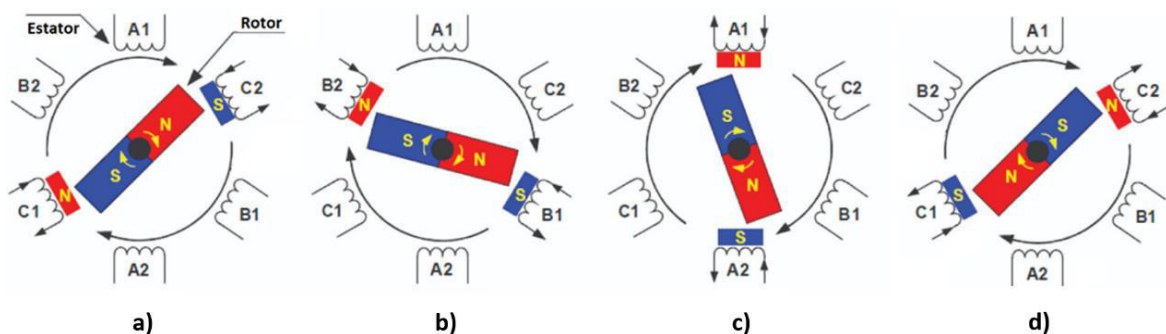


Figura A.2.1 – Ilustração de motor BLDC de 2 polos fazendo uso de apenas 1 enrolamento a cada instante (Adaptado de [23])

A utilização de dois enrolamentos em simultâneo ocorre como ilustrado na Figura A.2.2. Quando é utilizado apenas um enrolamento, são essencialmente as forças de atração as responsáveis por fazer

mover o rotor. Com o uso de dois enrolamentos em simultâneo tanto as forças de atração como as de repulsão desempenham um papel essencial.

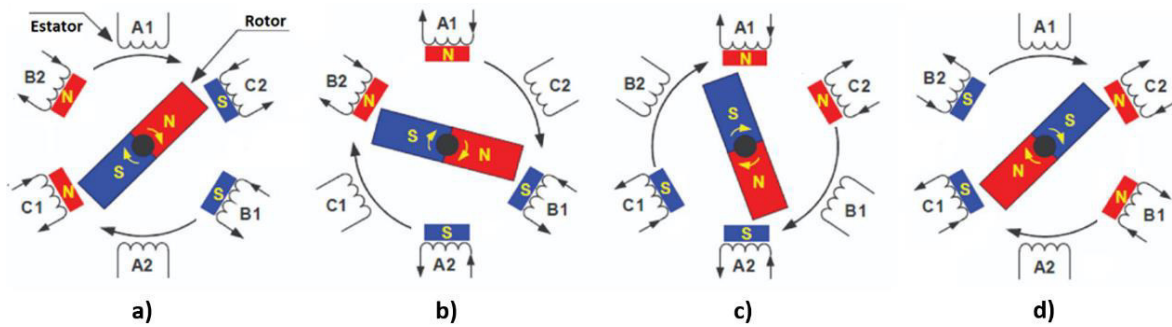


Figura A.2.2 – Ilustração de motor BLDC de 2 polos fazendo uso de 2 enrolamentos a cada instante (Adaptado de [23])

Analisando a transição entre Figura A.2.2 a) e b), é possível verificar que quando o rotor alcança o enrolamento **C** a alimentação comuta entre o enrolamento **C** e **A**. O eletroímã gerado pelo enrolamento **B** será responsável por atrair o rotor, enquanto que o eletroímã gerado pelo enrolamento **A** será responsável por o repelir.

Nesta configuração dois enrolamentos necessitam de ser alimentados separadamente, mas efetuando uma simples alteração no enrolamento do estator é possível simplificar o processo.

Conectando um dos terminais de cada enrolamento obtém-se uma conexão em forma de estrela (Figura A.2.3). A partir desta configuração é possível controlar a alimentação dos enrolamentos unicamente a partir de três terminais. Em cada instante são conectados à alimentação dois terminais, na Tabela A.2.1 é possível consultar todas as combinações possíveis, assim como quais os enrolamentos ativos e o sentido da corrente consoante os terminais conectados e a polarização destes.

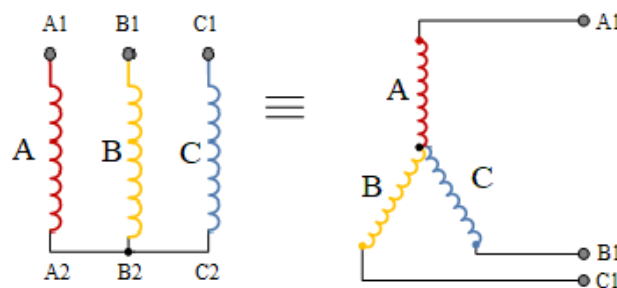


Figura A.2.3 – Ilustração ligação enrolamentos em formato estrela (Adaptado de [24])

A1	B1	C1	Enrolamentos ativos	Sentido Corrente
V+	V-	—	A e B	$A \rightarrow B$
V+	—	V-	A e C	$A \rightarrow C$
—	V+	V-	B e C	$B \rightarrow C$
V-	V+	—	A e B	$B \rightarrow A$
V-	—	V+	A e C	$C \rightarrow A$
—	V-	V+	B e C	$C \rightarrow B$

Tabela A.2.1 – Enrolamentos ativos e sentido da corrente consoante os terminais conectados e a polarização destes.